

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAĞLAÇ DİYAGRAMI TEKNİĞİNİ KULLANARAK
ANAHTARLI DEVRELERİN MODELLENMESİ VE
SİMÜLASYONU İÇİN BİR PROGRAM**

Arif GÜLTEN

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMENTASYON MERKEZİ

734,807

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

734807

ELAZIĞ, 2003

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAĞLAÇ DİYAGRAMI TEKNİĞİNİ KULLANARAK
ANAHTARLI DEVRELERİN MODELLENMESİ VE
SİMÜLASYONU İÇİN BİR PROGRAM**

Arif GÜLTEN

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 17/10/2003. tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa POYRAZ

Üye: Doç. Dr. Yakup DEMİR

Üye: Doç. Dr. Tülay YILDIRIM

Üye: Yrd. Doç Dr. M. Cevdet İNCE

Üye: Yrd. Doç Dr. Selçuk YILDIRIM

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun 12./11./2003 tarih ve 42./1 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince yardımlarını esirgemeyen ve değerli fikirleriyle bana yol gösteren danışman hocalarım, Sayın Prof. Dr. Mustafa POYRAZ ve Sayın Doç. Dr. Yakup DEMİR'e çok teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Tezin yazım aşamasında yardımcı olan ve tecrübelerinden faydalandığım kıymetli arkadaşlarım Dr. Ahmet ÇINAR'a, Yrd. Doç. Dr. İbrahim TÜRKOĞLU'na ve Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU'na ve fikirleriyle katkıda bulunan değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Mustafa TÜRK'e ve Öğr. Gör. Servet TUNCER'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışması süresince moral desteklerini esirgemeyen bölümdeki kıymetli hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim.

Son olarak tez çalışması boyunca gösterdikleri sabır ve desteklerinden, sağladıkları huzurlu çalışma ortamından dolayı sevgili eşime, anneme, babama ve kardeşime şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLolar LİSTESİ	VIII
EKLER LİSTESİ	IX
SİMGELER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
ÖZET	XIII
ABSTRACT	XIV
1. GİRİŞ	1
2. BAĞLAÇ DİYAGRAMI TEKNİĞİ	6
2.1. Giriş	6
2.2. Bağlaç Bileşeni	6
2.3. Nedensellik	8
2.4. Bir Kapılı Elemanlar	10
2.5. İki Kapılı Elemanlar	13
2.6. Çok Kapılı Elemanlar	14
2.7. Bağımlı Kaynakların Bağlaç Diyagramı Modeli	16
2.8. Bağlaç Diyagramı Modelinin Elde Edilişi	18
3. LİNEER OLMAYAN ELEMANLARIN BAĞLAÇ DİYAGRAMI	
MODELLERİ	20
3.1. Giriş	20
3.2. Anahtarlar	20
3.3. Eleman Durumu-Anahtar Pozisyonu (EDAP)	24
3.4. Kontrol Eşitsizlikleri	25
3.5. Lineer Olmayan Elemanların Parça-Parça Lineerlik Yaklaşımı İle Bağlaç	
Diyagramı Modelleri	27
3.5.1. Yarı İletken Elemanlar	27

3.5.2. Lineer Olmayan Dirençler	36
3.5.3. Lineer Olmayan Kapasitörler	40
3.5.4. Lineer Olmayan İndüktans	41

4. LİNEER OLMAYAN SİSTEMLERİN BAĞLAÇ DİYAGRAMI

MODELLERİ	43
4.1. Giriş	43
4.2. Sistem Durumu-Eleman Durumu (SDED)	43
4.3. Sistem Durumu-Anahtar Pozisyonu (SDAP)	45
4.4. Durum ve Çıkış Denklemlerinin Elde Edilmesi	45
4.5. Anahtarlama Denklemleri	49
4.6. Kontrol Eşitsizlikleri	51
4.7. Geçici ve Sürekli Hal Davranışı	52

5. BONDAN PROGRAMI

5.1. Kullanıcı Arabirimi	55
5.2. Data Girişi	56
5.3. Analiz Programı	61
5.3.1. HAZIRLA Altprogramı	64
5.3.2. BONDENK Altprogramı	64
5.3.3. SDAP2 Altprogramı	64
5.3.4. COZUM Altprogramı	65
5.3.5. FORM2 Altprogramı	65
5.3.6. DURUM Altprogramı	65
5.4. DOSYA Programı	66

6. ÖRNEKLER

6.1. Giriş	67
6.2. Örnek 1	67
6.3. Örnek 2	74
6.4. Örnek 3	77
6.5. Örnek 4	82
6.6. Örnek 5	88
6.7. Örnek 6	95

7. SONUÇ	97
7.1. Değerlendirme	97
7.2. Öneriler	97

KAYNAKLAR	99
------------------------	-----------

ÖZGEÇMİŞ

EKLER



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. (a), (b) Paynter gösterimi	6
Şekil 2.2. Aktif Bağlaç	7
Şekil 2.3. Nedenselliğin tanımı ve gösterimi	9
Şekil 2.4. (a) Çaba ve (b) akış kaynaklarının nedensellik tanımları	9
Şekil 2.5. (a) Transformatör ve (b) jirator elemanlarının nedensellik tanımları	9
Şekil 2.6. (a) 0- ve (b) 1-bağlantı elemanlarının nedensellik tanımları	10
Şekil 2.7. (a), (b) Direncin bağlaç diyagramı gösterimi ve nedensellik tanımları	10
Şekil 2.8. Direncin farklı enerji domenlerindeki karşılığı (a) Elektriksel (b) Mekanik (c) Hidrolik.....	11
Şekil 2.9. (a), (b) Kapasitörün bağlaç diyagramı gösterimi ve nedensellik tanımları	11
Şekil 2.10. Kapasitörün farklı enerji domenlerindeki karşılığı (a) Elektriksel (b) Mekanik (c) Hidrolik.....	12
Şekil 2.11. (a), (b) İndüktansın bağlaç diyagramı gösterimi ve nedensellik tanımları	12
Şekil 2.12. İndüktansın farklı enerji domenlerindeki karşılığı (a) Elektriksel (b) Mekanik (c) Hidrolik.....	13
Şekil 2.13. (a) Gerilim ve (b) akım kaynağının bağlaç diyagramı gösterimi ve nedensellik tanımları	13
Şekil 2.14. (a) Transformatör ve (b) module transformatörün bağlaç diyagramı gösterimi	13
Şekil 2.15. (a) Jirator ve (b) module jiratorün bağlaç diyagramı gösterimi	14
Şekil 2.16. Seri çok kapılının (a) bağlaç diyagramı gösterimi ve (b) elektriksel karşılığı	14
Şekil 2.17. Paralel çok kapılının (a) bağlaç diyagramı gösterimi ve (b) elektriksel karşılığı	16
Şekil 2.18. Bağımlı kaynakların bağlaç diyagramı gösterimleri (a) Gerilim kontrollü gerilim kaynağı (b) Akım kontrollü gerilim kaynağı (c) Gerilim kontrollü akım kaynağı (d) Akım kontrollü akım kaynağı	17
Şekil 2.19. (a) Örnek devre ve (b) devrenin düğüm noktalarının gösterimi	18
Şekil 2.20. (a), (b), (c) Şekil 2.19'daki devrenin bağlaç diyagramı modelinin adım adım elde edilişi	19
Şekil 3.1. İdeal anahtarın (a) açık ve (b) kapalı durumdaki gösterimi	20

Şekil 3.2. İdeal olmayan bir anahtarın eşdeğer devresi	21
Şekil 3.3. İdeal olmayan anahtar için diğer bir eşdeğer devre	22
Şekil 3.4. Anahtar modelleri için örnek bir elemanın (a) karakteristiği (b) eşdeğer devresi	22
Şekil 3.5. Anahtarın MTF ve direnç ile modellenmesi (a) Castelain (b) Ducreux modeli	23
Şekil 3.6. Anahtarın ilave bir 0-kapısı ve direnç ile modellenmesi (a) anahtar kapalı (b) anahtar açık	23
Şekil 3.7. Anahtarın ideal gerilim ve ideal akım kaynağı ile modellenmesi (a) anahtar kapalı (b) anahtar açık	24
Şekil 3.8. (a) İdeal diyotun gösterimi (b) i-v karakteristiği (c) eşdeğeri	27
Şekil 3.9. Eşik gerilimi (a) sıfır ve (b) V_D olan diyotun i-v karakteristikleri	28
Şekil 3.10. Şekil 3.9a'daki karakteristiğe ilişkin (a) eşdeğer devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli	29
Şekil 3.11. Şekil 3.9b'deki karakteristiğe ilişkin iki farklı eşdeğer devre	30
Şekil 3.12. Şekil 3.11'deki eşdeğer devrelerin bağlaç diyagramı modelleri	30
Şekil 3.13. Zener diyotun (a) gösterimi ve (b) akım-gerilim karakteristiği	31
Şekil 3.14. Şekil 3.13b'deki karakteristiği temsil eden (a) eşdeğer devre ile (b) bağlaç diyagramı modeli	31
Şekil 3.15. (a) Tristörün gösterimi (b) i-v karakteristiği	32
Şekil 3.16. Şekil 3.15b'deki karakteristiğe ilişkin (a) eşdeğer devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli	33
Şekil 3.17. (a) Transistör (b) baz karakteristiği (c) kollektör karakteristiği	33
Şekil 3.18. (a) Şekil 3.17b ve 3.17c'deki karakteristikleri temsil eden eşdeğer devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli	34
Şekil 3.19. (a) IGBT (b) I_C - V_{GE} karakteristiği (c) I_C - V_{CE} karakteristiği	34
Şekil 3.20. Şekil 3.20b ve 3.20c'deki karakteristiklere ilişkin eşdeğer devre	35
Şekil 3.21. Şekil 3.20'deki eşdeğer devrenin bağlaç diyagramı modeli	36
Şekil 3.22. (a) Lineer olmayan direnç (b) Gerilim kontrollü ve (c) Akım kontrollü i-v karakteristikleri	36
Şekil 3.23. Şekil 3.22b'deki karakteristiğe ilişkin eşdeğer devreler	37
Şekil 3.24. Şekil 3.23'deki eşdeğer devrelerin bağlaç diyagramı modelleri	38
Şekil 3.25. Şekil 3.23c'deki karakteristiğe ilişkin eşdeğer devreler	39
Şekil 3.26. Şekil 3.25'deki eşdeğer devrelerin bağlaç diyagramı modelleri	40
Şekil 3.27. (a) Lineer olmayan kapasitör ve (b) iki durumlu q-v karakteristiği	40

Şekil 3.28. (a) Şekil 3.27b'deki karakteristiği temsil eden eşdeğer devre ve	
(b) bağlaç diyagramı modeli	41
Şekil 3.29. (a) Lineer olmayan indüktans (b) iki durumlu λ -i karakteristiği	41
Şekil 3.30. (a) Şekil 3.29b'deki karakteristiği temsil eden eşdeğer devre ve	
(b) bağlaç diyagramı modeli	42
Şekil 4.1. (P+Q)-kapılı zamanla değişmeyen kaynaksız lineer sistem	46
Şekil 5.1. BONDAN Kullanıcı Arabirimi	55
Şekil 5.2. (a), (b), (c) Bağlaç diyagramı modelinde transformatör ve jirator	
bulunduğunda numaralandırma tekniği	57
Şekil 5.3. (a) Data girişinin yapılışının gösterimi için örnek devre ve	
(b) numaralandırılmış bağlaç diyagramı modeli	59
Şekil 5.4. BONDAN programının akış diyagramı	63
Şekil 6.1. (a) Örnek 1'e ilişkin devre ve (b) lineer olmayan direncin	
akım-gerilim karakteristiği	68
Şekil 6.2. Şekil 6.1b'deki karakteristiğe ilişkin eşdeğer devre	68
Şekil 6.3. (a) Yeni eşdeğer devre ve (b) devrenin bağlaç diyagramı modeli	70
Şekil 6.4. (a) İndüktans akımı (I_L), (b) kapasitör gerilimi (V_C) ve	
(c) lineer olmayan direncin geriliminin (V_{RN}) zamana göre değişimi	73
Şekil 6.5. Doğrusal olmayan direncin geriliminin değişiminde anahtarlama	
anlarının görünümü	74
Şekil 6.6. (a) Örnek 2'ye ilişkin devre, (b) devrenin bağlaç diyagramı modeli	74
Şekil 6.7. (a) Kapasitör gerilimi (V_C), (b) indüktans akımı (I_L) ve	
(c) tristör geriliminin (V_T) zamana göre değişimi	77
Şekil 6.8. Serbest uyarmalı doğru akım motoru	78
Şekil 6.9. Serbest uyarmalı doğru akım motorunun direnitle frenlemesi	79
Şekil 6.10. (a) Serbest uyarmalı doğru akım motorunun direnitle frenlemesi	
için eşdeğer devre ve (b) devrenin bağlaç diyagramı modeli	79
Şekil 6.11. (a) Endüvi akımının (I_e) ve açısal hızın (ω) zamana göre değişimi	81
Şekil 6.12. (a) Örnek 4'e ilişkin devre ve (b) devrenin bağlaç diyagramı modeli	82
Şekil 6.13. (a) Açısal hızın (ω) ve (b) endüvi akımının (I_e) zamana göre değişimi	87
Şekil 6.14. Tetikleme açısının açısal hızı etkisi	88
Şekil 6.15. Örnek 5'e ilişkin devre	89
Şekil 6.16. Doğrusal olmayan direncin (a) karakteristiği ve (b) eşdeğer devresi	89
Şekil 6.17. (a) Yeni eşdeğer devre ve (b) devrenin bağlaç diyagramı modeli	90

Şekil 6.18. (a) C_1 kapasitör geriliminin (V_{C_1}) ve (b) C_2 kapasitör geriliminin (V_{C_2}) zamana göre değişimi	93
Şekil 6.19. İkili kıvrımlı çekici davranışı	93
Şekil 6.20. Spiral çekici davranışı	95
Şekil 6.21. (a) Örnek 6'ya ilişkin mekanik devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli.....	95
Şekil 6.22. Hızın zamana göre değişimi.....	96



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Bağlaç diyagramı değişkenlerinin çeşitli enerji domenlerindeki karşılıkları.....	7
Tablo 2.2. Bağlaç diyagramı elemanlarının gösterimleri, nedensellik tanımları ve matematiksel ifadeleri.....	17



EKLER LİSTESİ

EK 1.1 : Örnek 1' e ilişkin bilgisayar çıktısı

EK 1.2 : Örnek 2' ye ilişkin bilgisayar çıktısı



SİMGELER LİSTESİ

A_k, B_k	: Durum denklemlerine ilişkin katsayı matrisleri
AK	: Akım kaynağı
$\alpha_{k,j}$	: Anahtarlama zamanı
C	: Kapasitans
C_k, D_k	: Çıkış denklemlerine ilişkin katsayı matrisleri
e	: Çaba değişkeni
f	: Akış değişkeni
$F_{kj}, G_{kj,i}$	: Durum denklemlerine ilişkin katsayı matrisleri
g	: İletkenlik
GK	: Gerilim kaynağı
I	: Atalet
JR	: Jirator
k	: Jirator elemanı için aktarım oranı
L	: İnduktans
m	: Transformatör elemanı için dönüştürme oranı
MJR	: Modüle jirator
MTF	: Modüle transformatör
PI	: Düğümler (incidence) matrisi
q	: Yük
R	: Direnç
S	: Anahtar
Se	: Çaba kaynağı
Sf	: Akış kaynağı
TF	: Transformatör

TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
ULUSLARARASI İLİŞKİLER GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
ULUSLARARASI İLİŞKİLER GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

- $u(t)$: Giriş (kaynak) fonksiyonları
 w : Açısal frekans
 X : Durum değişkenleri vektörü
 y : Çıkış büyüklükleri vektörü



KISALTMALAR LİSTESİ

EDAP	: Eleman Durumu-Anahtar Pozisyonu
SDAP	: Sistem Durumu-Anahtar Pozisyonu
SDED	: Sistem Durumu-Eleman Durumu



ÖZET

Doktora Tezi

BAĞLAÇ DİYAGRAMI TEKNİĞİNİ KULLANARAK ANAHTARLI DEVRELERİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU İÇİN BİR PROGRAM

Arif GÜLTEN

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2003, Sayfa: 102

Bu tezde anahtarlı devrelerin, bağlaç diyagramı modelini kullanarak modellenmesi ve simülasyonu için bir yöntem sunulmuştur ve BONDAN isimli bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bunun için lineer olmayan elemanların karakteristiklerine parça-parça lineerlik yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımla lineer olmayan elemanlar anahtarlar ve lineer elemanlarla birlikte, EDAP (Eleman Durumu–Anahtar Pozisyonu) Matrisi ve kontrol eşitsizlikleri kullanılarak modellenmektedir. Anahtarların farklı pozisyonlarından dolayı oluşan sistem durumları SDAP (Sistem Durumu–Anahtar Pozisyonu) Matrisi, elemanların farklı durumlarından dolayı oluşan sistem durumları da SDED (Sistem Durumu–Eleman Durumu) Matrisi ile tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada bağlaç diyagramı tekniğinde anahtarı tanımlamak için basit ve fiziksel sistemlere daha uygun olan bir yaklaşım kullanılmaktadır. Tek bir sistem durumu için bağlaç diyagramı modeli elde edilmekte, diğer sistem durumlarına geçiş SDAP matrisi ile yapılmaktadır. İlgili matrisler kullanılarak her sistem durumu için durum, çıkış ve anahtarlama denklemleri elde edilmektedir. Ayrıca durum ve çıkış denklemleri kullanılarak geçici ve sürekli hal cevapları bulunmaktadır. Çözüm işleminde doğrudan kesin sonuçları veren formüllerden yararlanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bağlaç diyagramı modeli, parça-parça lineerlik yaklaşımı, anahtarlı devreler, modelleme, sistem durumu, eleman durumu.

SUMMARY

PhD Thesis

A PROGRAM FOR MODELLING AND SIMULATION OF CIRCUITS CONTAINING SWITCHES USING THE BOND GRAPH TECHNIQUE

Arif GÜLTEN

Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

2003, Page: 102

In this thesis, a new method has been presented for the modelling and simulation of circuits containing switches by using bond graph technique and a computer program BONDAN has been prepared. For this purpose, piecewise linearization approach has been applied to characteristics of nonlinear components. By means of this approach, nonlinear components are modelled by both switches and linear components by using Component State-Switch Position (CSSP) Matrix and control inequalities. In this approach, SSSP (System State-Switch Position) and SSCS (System State-Component State) define the system states revealing with different switch position and different component states, respectively.

In this study, an approach which is simpler and more suitable for the physical system has been used for definition of switches. Bond graph model has been obtained for only one system state. On the other hand, the transition to the other system states has been accomplished by the SSCS Matrix. The state, output and switching equations for all system states have been obtained by using the involved matrixes. In addition, the transient and steady state responses have been computed by using the equations. In the analysis, it has been made use of explicit exact formulas.

Key Words: Bond graph model, piecewise linearization approach, circuits containing switches, modelling, system state, component state.

1. GİRİŞ

Bağlaç diyagramı tekniği sistemlerin modellenmesi amacıyla geliştirilen yöntemlerden birisidir [1-6]. Klasik anlamda bilinen graflar ile bağlaç diyagramı tekniği arasında sıkı bir benzerlik vardır. Bağlaç diyagramı tekniğinin klasik topolojik düzlemsel graflarla yapılan sistem analizine göre üstünlüğü, herhangi bir karmaşık yapılı fiziksel sistemin modelinin geometrik ve gözleme dayanan bir yolla doğrudan sisteme bakılarak elde edilebilmesidir. Ayrıca enerji kapılarının bir başka kapı ile kontrol edilmesi durumunda da bağlaç diyagramı yöntemi avantajlıdır. Bağlaç diyagramı modelinin en önemli özelliklerinden birisi de, modelin elde edilmesi ile değişik enerji modundaki sistemlerin (karmaşık yapılı sistemler) tek bir modele dönüşmesi ve bu model üzerinde işlem görmeleridir. Ayrıca sistemdeki enerji alış veriş model üzerinde ilk bakışta açıkça görülür, bu da tasarımcıya kolaylıklar sağlar. Bağlaç diyagramları mekanik, elektriksel, hidrolik veya bütün bu sistemlerin kombinasyonu şeklindeki sistemleri temsil etmede kullanılabilir. Örneğin elektro-mekanik bir sistem için elektriksel ve mekanik alt sistemlerin ayrı ayrı analizini yapmaksızın bütün bir sistem olarak analiz edilebilmesini sağlar. Son yıllarda bir çok araştırmacı bağlaç diyagramı metodunu kullanarak elektrik devrelerinin ve sistemlerin analizi için çalıştı [7-13].

Elektrik devrelerinin ve sistemlerin modellenmesi ve analizi için bir çok yöntem vardır [14-17]. Bu yöntemlerden birisi de parça-parça lineerlik yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda lineer olmayan elemanlar, lineer zamanla değişmeyen elemanlar ve ideal anahtarlar kullanılarak modellenirler. Günümüzde anahtarlar özellikle elektronik ve güç elektroniği endüstrisinde oldukça fazla kullanılan devre elemanlarından birisidir. Özellikle lineer olmayan sistemlerin, parça-parça lineerlik yaklaşımı yapılarak lineer sistemlere dönüştürülmesi sonucu ve son yıllarda bu yaklaşımın öneminin artması nedeniyle anahtarlar vazgeçilmez devre elemanlarından birisi olmuştur [18-19]. Karakteristikleri lineer olmayan güç elektroniği devre elemanlarını hızlı anahtarlama, küçük bir güçle kontrol edebilme, küçük boyut, sessiz çalışma, düşük maliyet ve uzun ömür gibi çeşitli özellikleri vazgeçilmez hale getirmiştir. Dolayısıyla bu elemanların yada lineer olmayan elemanların yer aldıkları devrelerin analizi daha fazla önem kazanmıştır ve bunun için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir [20-23].

Bağlaç diyagramı tekniği kullanılarak anahtarlı devrelerin ve sistemlerin (bundan sonra devre ve sistem kelimeleri aynı anlamda kullanılacaktır) analizinde üzerinde durulan önemli konulardan birisi anahtarın bağlaç diyagramı tekniğindeki tanımı ve modellemesidir. Bunun için birçok yaklaşım yapılmıştır [24-34]. Bu tanımlardan bazıları çeşitli dezavantajlara sahip olup bu konu üzerinde Bölüm 3’de ayrıntılı olarak durulacaktır. Köksal, kapalı anahtarları gerilim

kaynağı ve açık anahtarları da akım kaynağı kabul ederek durum uzayı formülasyonunu kullanmıştır [35]. Köksal'ın bu tanımından esinlenerek bağlaç diyagramı metodunda hem basit ve fiziksel sistemlere daha uygun olan, hem de formülasyon ve çözüm aşamasında bilgisayar belleği ve zamanının ekonomik biçimde kullanılmasını sağlayan bir anahtar tanımı [33]'de verilmiştir. Bu tezde de bahsedilen yaklaşım kullanılmıştır.

Bazı araştırmacılar yukarıda verilen tanımları kullanarak çeşitli güç elektroniği elemanlarının modellenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir [36-40]. Bir kısım araştırmacılar ise bazı özel sistemlerin analizini yapmışlardır. Junco, seri bir DC motorun hızını alan zayıflatma direnci ve buna seri bağlı bir ideal anahtar kullanarak kontrol etmiştir [41]. Ghosh, akım kaynağı inverteri ile sürülen bir indüksiyon motorlu sistemin bağlaç diyagramı tekniği ile analizini gerçekleştirmiştir [42]. Asher, güç elektroniği devrelerinin bağlaç diyagramı tekniği kullanılarak simülasyonuna yönelik çalışmalar yapmıştır [43]. Allard bir güç transistörünün simülasyonunu gerçekleştirmiştir [44]. Bu çalışmalarda, bağlaç diyagramı tekniğini kullanarak simülasyon gerçekleştiren ENPORT [45,46], TUTSIM [47], 20-SIM [48,49], MODELICA [50,51], DYMOLA [52] ve CAMP-G [53] gibi paket programlar kullanılmıştır. Delgado ise anahtarlama mod DC-DC güç kaynağının modellemesini ve simülasyonunu gerçekleştirmiştir [54]. Bu çalışmada, geliştirdiği DESIS [55] adlı bir program kullanmıştır. Anahtarlı devrelerin ve sistemlerin bağlaç diyagramı yöntemiyle modellenmesine de uygun olan yeni bir formülasyon yöntemi ve bilgisayar yazılımı Demir ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [33-34].

Yukarıda bahsedilen paket programlar ve kişisel yazılımların hiçbiri anahtarlı devrelerin simülasyonuna yönelik programlar değildir. Bu yöndeki ihtiyaca cevap vermek amacıyla bu çalışmada BONDAN adlı bir program geliştirilmiştir. Programda anahtar elemanı standart bağlaç diyagramı elemanları gibi data olarak girilebilmektedir. Ayrıca farklı anahtar pozisyonlarından meydana gelen bütün sistem durumları tek bir bağlaç diyagramı modelinden hareketle bulunmakta ve bu durumlara ait sistemin durum uzay gösterimi elde edilmektedir. Diğer programların bazılarında durum değişkenleri olarak kapasitörün yükü ve indüktansın akısı alınırken, BONDAN programında kapasitör gerilimi ve indüktans akımı durum değişkenleri olarak alınmaktadır.

Lineer olmayan eleman/elemanlardan oluşan sistemler lineer sistemlere göre oldukça farklıdır. Örneğin sinüzoidal uyarıya karşı davranışları, devrenin başlangıç şartlarına, uygulanan sinyalin genliğine, frekansına ve fazına bağlı olarak çok değişik özellikler gösterebilir. Peryodik olarak uyarıldıkları zaman sürekli rejim davranışları periyodik olan lineer olmayan sistemlere her zamankinden farklı olarak ilk yaklaşım Köksal tarafından yapılmıştır. Bu yaklaşımda doğrudan periyodik olarak zamanla değişen sistemler için geliştirilen analiz

yöntemleri kullanılır [18,19]. Peryodik uyarı olarak da sadece sinüzoidal uyarılar değil Fourier dizisi ile gösterilenebilen bütün periyodik uyarıları göz önüne alınır. Güç elektroniği devrelerinin analizi için Türkbeyler, Köksal'ın yukarıda bahsolunan metodundan yararlanarak bir yaklaşımda bulunmuştur [56]. Lineer olmayan elemanların parça-parça lineer olarak göz önüne alındığı bu yaklaşımda lineer olmayan elemanlar, lineer elemanlar ve periyodik olarak çalışan anahtarlardan oluşan eşdeğer devrelerle modellenmiştir. Her lineer olmayan elemanın birden fazla farklı duruma sahip olduğu ve bu durumlarda kalma sürelerinin sistem cevabı tarafından belirlendiği kabul edilmiştir. Ana periyot sistemin zamanla değişmeyen lineer sistem olarak alt aralıklara bölünerek analiz gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşımın en iyi yanı nümerik integrasyon kullanmadan doğrudan sürekli rejim çözümünü elde etmesidir. Güç elektroniği devrelerinin veya genel olarak parça-parça lineer veya dışardan kontrollü elemanların yer aldığı devrelerin sürekli hal analizli için Herdem, Türkbeyler'in yukarıda bahsolunan metodunu da kapsayan daha genel bir yaklaşımda bulunmuş ve bunun için bir bilgisayar programı hazırlamıştır [23]. Bu program, önce analizi yapılan sistemin sürekli halde girdiği durumları ve bu durumlara geçiş zamanlarının yaklaşık değerlerini belirlemekte, daha sonra geçiş zamanlarının gerçek değerlerini istenilen hassasiyette belirleyerek sürekli hal çözümünü bulmaktadır. Sürekli haldeki sistem durumları bulunurken sistemi tanımlayan denklemlerin tam çözümü yapılmaktadır. Bu çözümde de nümerik integrasyon kullanılmayıp her t değeri için çözüm doğrudan elde edilmiştir. Dolayısıyla büyük çözüm adımları kullanılarak çok kısa sürede sonuç elde edilebilmektedir.

Lineer olmayan devrelerin analizinde takip edilen metodlardan birisi devre elemanlarının değişik çalışma bölgeleri içinde anahtarlar, kaynaklar ve lineer elemanlarla özdeşleştirilmesidir. Özellikle periyodik olarak açılıp kapanan anahtarlar içeren lineer devrelerin analizinde son yıllarda yapılan yenilikler ve geliştirilen yöntemler bu yaklaşımın önemini artırmıştır. Devrede anahtarların bulunması, durum ve çıkış denklemlerine ilaveten anahtarların açılıp kapanmaları ile oluşacak süreksizliklerin hesaplanması için anahtarlama denklemlerinin de kullanılmasını gerektirmiştir [22,23].

Lineer olmayan sistemlerin parça-parça lineer yapılarak periyodik anahtarlar içeren lineer devreler gibi formülasyonuna göre en önemli farklılığı anahtarlama zamanlarının önceden bilinmiyor olmasıdır. Dolayısıyla sadece durum, çıkış ve anahtarlama denklemleri formülasyon ve çözüm için yeterli değildir. Bunlara ilaveten kontrol eşitsizliklerinin de kullanılması gereklidir [22]. Çünkü sistemin hangi sistem durumunda olduğunun belirlenebilmesi, aynı zamanda eleman durumlarını belirlemek için de kullanılan kontrol eşitsizlikleri ile mümkündür. Ayrıca lineer bir devreyi oluşturan elemanların matematik modellerinde uç denklemleri elemanları tanımlamak için yeterlidir. Ancak lineer olmayan bir eleman modellendiğinde

eşdeğer devre elemanlarının uç denklemlerine ek olarak kontrol eşitsizliklerinin de kullanılması gerekmektedir. Uç denklemleri ve/veya eşdeğer devreleri aynı fakat kontrol eşitsizlikleri farklı olan elemanlar farklı davranış gösterirler.

Bu çalışma özellikle anahtarlar içeren sistemlerin modelleme ve simülasyonunda bağlaç diyagramı tekniğinin kullanımını içerir. Bu amaçla BONDAN isimli bir bilgisayar programı geliştirilmiştir ve bu program hem lineer hem de lineer olmayan sistemler için uygundur. Ayrıca lineer sistemlerin bağlaç diyagramı tekniği ile analizi mevcut yöntemlerle ve paket programlarla yapılabildiğinden burada lineer olmayan sistemlere odaklanılmıştır. Bu çalışmada lineer olmayan elemanlar, parça-parça lineerlik yaklaşımı kullanılarak lineer elemanlar ve anahtarlardan oluşan eşdeğer devrelerle modellenmiştir. Sistemde lineer olmayan elemanların yerine eşdeğerleri yerleştirilerek sistemin bağlaç diyagramı modeli elde edilmekte ve geliştirilen programla formülasyon ve çözüm gerçekleştirilmektedir. BONDAN programının en önemli özelliği anahtarı standart bir bağlaç diyagramı elemanı olarak tanımasıdır. Sistemin bağlaç diyagramı modeli sistemdeki bütün anahtarların açık olduğu durum için elde edilmekte ve anahtarların farklı pozisyonlarından dolayı oluşan diğer sistem durumlarına geçiş ileriki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacak EDAP, SDED ve SDAP Matrisleri yardımıyla gerçekleştirilmektedir. EDAP Matrisi, lineer olmayan elemanların durumlarını eşdeğer devredeki anahtarların pozisyonlarına göre tarif eder. Eşdeğer devredeki anahtarların farklı pozisyonları lineer bölgeleri temsil etmektedir. Lineer olmayan elemanın eşdeğer devresindeki anahtarların sayısı fazla olursa ve birbirinden bağımsız çalıştıkları düşünülürse, sistem durumlarının sayısı ve bu durumlar arasındaki geçişlerin sayısı da fazla olur. Sistemin hiçbir zaman girmeyeceği durumların hem eleman bazında hem de sistem bazında kısıtlanması EDAP, SDAP ve SDED Matrisleri ile birlikte Kısıtlama Matrisi yardımıyla yapılır. SDAP Matrisi, EDAP Matrisi kullanılarak oluşabilecek sistem durumlarını anahtar pozisyonlarına göre tanımlar. SDED Matrisi, eleman durumlarının birbirlerine göre farklı kombinasyonlarından oluşan sistem durumlarını gösterir. Kısıtlama Matrisi ise sistemde aynı anda olması gereken yada aynı anda olamayacak durumlar varsa bu sistem durumlarını elimine eder. Tanımlanan bu matrisler yardımıyla bağlaç diyagramı modelleri arasında geçiş sağlanmakta ve tek bir model üzerinden işlem yapılmaktadır. Farklı sistem durumları için durum ve çıkış denklemleri elde edilmektedir. Durum uzay gösterimi mevcut olan bir sistem için de analizin farklı aşamalarını gerçekleştirmek mümkündür. Bu çalışmada durum ve çıkış denklemleri kullanılarak çözüm aşaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada ve gerçekleştirilen programda anahtarlama denklemleri de elde edilmiş olmasına rağmen, örnek devrelerde durum değişkenleri sürekli kabul edildiğinden kullanılmamıştır. Fakat ileriki bir çalışmada da kullanılabilme ihtimali olabileceğinden formülasyon aşamasında yer almıştır.

Tezin geri kalan kısmı için organizasyon aşağıdaki gibidir:

İkinci bölümde bağlaç diyagramı tekniğinin temel prensipleri izah edilmiş ve standart bağlaç diyagramı elemanları tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde parça-parça lineerlik yaklaşımı kullanılarak lineer olmayan elemanların bağlaç diyagramı modelleri EDAP Matrisi ve kontrol eşitsizlikleri ile birlikte tanımlanmıştır.

Dördüncü bölümde lineer olmayan sistemlerin bağlaç diyagramı modelleri SDED, SDAP ve Kısıtlama Matrisleri ve ayrıca sistem bazındaki kontrol eşitsizlikleri ile birlikte verilmiştir. Bu bölümde ayrıca durum, çıkış ve anahtarlama denklemlerinin formülasyonu tanıtılmıştır. Bu bölümün sonunda, çalışmanın bir bütünlük oluşturması için yapılan formülasyona ve programa uygun olarak seçilen geçici ve sürekli hal çözümü anlatılmıştır. Bununla birlikte anahtarlı sistemler için lineer bölgelerdeki durum denklemlerinin elde edilişi için uygulanan yöntem ile bu tür sistemler için geçici ve sürekli rejim cevaplarının elde edilmesi için izlenen yoldan bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde BONDAN programının genel bir tanıtımı yapılmıştır. Programdaki dataların tanımı ve bu dataların kullanıcı tarafından nasıl girileceği tarif edilmiştir. Ayrıca geliştirilen programın akış şeması verilmiş ve programa ait altprogramlar kısaca tanıtılmıştır.

Altıncı bölümde, hazırlanan bilgisayar programının yetenekleri ve özelliklerini ortaya koymak için değişik örnekler verilmiştir.

Yedinci bölümde çalışmaya ilişkin sonuç ve değerlendirmeler verilmiştir. Ayrıca tezin getirdiği yenilik ve avantajlarla birlikte daha sonraki çalışmalar için yol gösterecek bazı tavsiyelerden bahsedilmiştir.

Tezin ek kısmında ise Bölüm 6'daki örneklerden ilk ikisine ilişkin program çıktıları yer almaktadır.

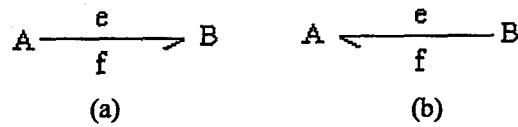
2. BAĞLAÇ DİYAGRAMI TEKNİĞİ

2.1. Giriş

Bağlaç diyagramı modelinin oluşturulmasında temel düşünce, bir sistemin birbirine bağlı olan fiziksel bileşenleri arasında güç alış verişi olmasıdır. Bu konudaki ilk çalışmayı Paynter 1961 yılında işaret akış diyagramlarından esinlenerek gerçekleştirmiştir [1]. Bağlaç diyagramı ifadesi de bahsi geçen ve literatürde bond graf olarak bilinen tekniğin dilimize N. Şen tarafından çevrilmesiyle ortaya çıkmıştır [7]. Bağlaç diyagramı tekniği özellikle karmaşık yapıdaki sistemlerin analizinde büyük kolaylık sağlar. Verilen karmaşık yapıli sistemlerin modelini elde etmede ve simülasyonunu gerçekleştirmede gözleme dayalı bir yol olduğundan uygulanması kolaydır. Karmaşık yapıya sahip bir sistem, kendisini oluşturan fiziksel bileşenlerin enerji domenleri ne olursa olsun, aralarındaki enerji kapıları yardımıyla birleştirilerek modellenenilir.

2.2. Bağlaç Bileşeni

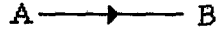
En basit bağlaç bileşeni A ve B gibi iki alt sistem yada iki enerji kapısı arasında Şekil 2.1'deki gibi A'yı B'ye bağlayan bir çizgi parçası ile gösterilir. Bu gösterim Paynter tarafından tanımlanmış olup A'dan B'ye (yada B'den A'ya) bir $e \times f$ gücünün aktarıldığını ifade eder [1]. Burada; e çaba (uç) değişkeni, f ise akış (iç) değişkenidir.



Şekil 2.1. (a), (b) Paynter gösterimi

Bir sistemde elemanlar arasında sürekli güç alış verişi mevcuttur. Güç değişkenleri olarak tanımlanan büyüklüklerin işaretlerine bağlı olarak güç akışı her iki yönde de olabilir. Bağlaç diyagramı tekniğinde gücü oluşturan değişkenler, çaba ve akış değişkenleri olarak adlandırılır. Güç, bir kapının içine doğru veya o kapıdan dışarı doğru olup, çaba ve akış değişkenlerinin çarpımı olarak ifade edilebilir. P güç olmak üzere, Şekil 2.1a'da verilen gösterimde A'dan B'ye $P = e \times f$ gücünün aktarıldığı, Şekil 2.1.b'de ise B'den A'ya $P = e \times f$ gücünün aktarıldığı gösterilmektedir. Dinamik bir sistemde çaba ve akış değişkenleri,

dolayısıyla güç zamanla değişecektir. Bağlacın, yani güç akışını gösteren okun yönü e ve f 'nin yönlerinden bağımsızdır.



Şekil 2.2. Aktif Bağlaç

Güç akışını gösteren bağlaç bileşeninin yanı sıra bağlaç diyagramı tekniğindeki diğer bir bileşen de aktif bağlaç bileşenidir. Aktif bağlaç Şekil 2.2'de görüldüğü gibi tam bir ok ile gösterilir ve blok diyagramlardan alınan bu gösterimle A'dan B'ye çaba yada akış değişkeninin aktarıldığı ifade edilmektedir. Normal bir bağlaç, çaba ve akış olmak üzere iki sinyale sahipken aktif bağlaç, bu sinyallerden sadece biriyle ilişkilidir [3].

Tablo 2.1 Bağlaç diyagramı değişkenlerinin çeşitli enerji domenlerindeki karşılıkları

Enerji Domeni	Akış Değişkeni	Çaba Değişkeni	İntegral Akış Değişkeni	İntegral Çaba Değişkeni
Elektrik	Akım(i)	Gerilim(V)	Yük(q)	Akı (λ)
Mekanik (Ötelemeli)	Hız (V)	Kuvvet(F)	Yer Değiştirme(X)	Momentum(p)
Mekanik (Dönmesel)	Açısal Hız (ω)	Dönme Momenti (τ)	Açısal Yer değiştirme (θ)	Açısal Momentum (p_τ)
Akışkan	Debi (Q)	Basınç (P)	Hacim (V)	Basınç Momentumu (p_p)
Isıl	Isı Akış Hızı(q)	Isı (T)		

Tablo 2.1'de çeşitli enerji domenindeki sistemlerin çaba ve akış değişkenleri gösterilmiştir [5]. Elektrik devrelerinde çaba değişkeni gerilim, akış değişkeni ise akımdır. Bağlaç diyagramı tekniğinde güç değişkenlerinden başka diğer türde değişkenler de sistemleri tanımlamak için kullanılabilir. Bunlar genelleştirilmiş momentum $p(t)$ ve genelleştirilmiş yer değiştirme $q(t)$ olarak adlandırılır. Momentum çabanın zamana göre integrali ve yer değiştirme

ise akışın zamana göre integralidir. Elektriksel sistemlerde genelleştirilmiş momentum akı (λ), genelleştirilmiş yer değiştirme ise elektriksel yük (q) olarak tanımlanır. Genelleştirilmiş momentum ve yer değiştirme değişkenlerinin matematiksel tanımları Denklem (2.1) ve (2.2)'de verilmiştir.

$$p(t) = \int_{t_0}^t e(t) dt = p_0 + \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (2.1)$$

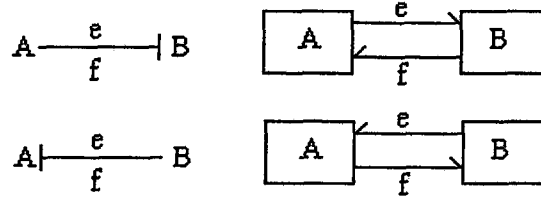
$$q(t) = \int_{t_0}^t f(t) dt = q_0 + \int_{t_0}^t f(t) dt \quad (2.2)$$

Bağlaç diyagramı tekniğinde kullanılan standart elemanlar vardır. Bunlar farklı enerji domenlerindeki sistemlerin ortak değişkenlerle ifade edilmesini sağlarlar. Farklı enerji domenlerindeki sistemler, analogi yardımıyla standart bağlaç diyagramı elemanları kullanılarak modellenir. Bağlaç diyagramı tekniğindeki standart elemanlar S_e (çaba kaynağı), S_f (akış kaynağı), R (direnç), I (atalet), C (kapasitör), TF (transformatör), JR (jirator) elemanları ile 0- ve 1-bağlantı elemanlarıdır.

2.3. Nedensellik

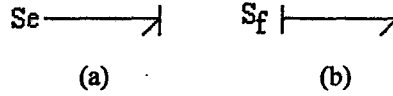
Şekil 2.1'deki gösterim A'dan B'ye yada B'den A'ya doğru bir gücün aktarımını temsil etmektedir. Fakat gücü oluşturan çaba ve akış değişkenlerinin her ikisinin yönünün de bu gösterimde bulunması gerekir. Nedensellik özelliği kullanılarak sebep sonuç ilişkisinin bağlaç üzerinde gösterilmesiyle oluşturulan diyagramın herhangi bir yerindeki niceliğin, diyagramın başka bir yerindeki niceliği nasıl etkilediği belirtilir ve böylece sebepten sonuca doğru bir nedensellik yolu izlemek mümkün olur [3].

Nedensellik bir bağlacın herhangi bir ucuna kısa ve dikey bir çizgi eklenerek gösterilir. Kısa ve dikey çizgi veya nedensel çizgi, çaba ve akış değişkenlerinin bağlaç üzerinde aynı anda nasıl yönlendiğini gösterir. Çaba değişkeni nedensel çizgiye doğru gider ve akış değişkeni de çizgiden dışarı doğru yönelir. Buradan çaba ve akış değişkenlerinin bağlaç üzerinde daima ters yönde olduğu sonucu çıkartılabilir. Ayrıca nedensellik çizgisinin konumu ile güç akışının yönü de birbirinden bağımsızdır. Giriş-çıkış nedenselliği bağlaç diyagramlarının eşsiz bir özelliğidir ve sistemin matematiksel gösteriminin oluşturulmasının temelinde yatan özelliktir. Şekil 2.3'de nedenselliğin tanımı ve gösterimi verilmiştir.



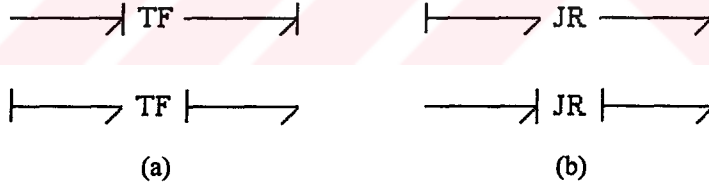
Şekil 2.3. Nedenselliğin tanımı ve gösterimi

Bağlaçlardaki nedensellik belli kuralları izlemek zorundadır. Örneğin, çaba ve akış kaynakları için nedensellik tanımları sabittir. Çaba kaynağı ve akış kaynağı için eleman hangi değişkenle sistemi etkiliyorsa nedensellik tanımı ona göre belirlenir. Bu elemanlar için izin verilen nedensellik tanımlamaları Şekil 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.4. (a) Çaba ve (b) akış kaynaklarının nedensellik tanımları

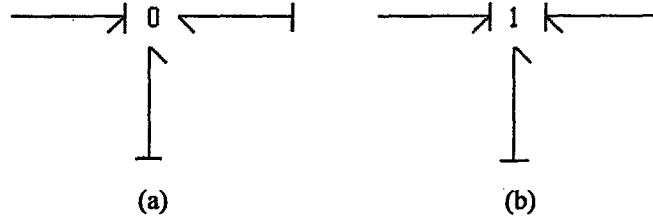
Transformatör ve jirator elemanları için mümkün olabilecek iki tane nedensellik tanımlaması bulunmaktadır. Şekil 2.5'de bu elemanların nedensellik tanımlamaları görülmektedir. Transformatör nedenselliği aynı yönde iletir, jirator ise nedenselliğin yönünü değiştirir. Yani jirator giren bir çaba nedenselliği akış nedenselliği olarak çıkacaktır.



Şekil 2.5. (a) Transformatör ve (b) jirator elemanlarının nedensellik tanımları

0- ve 1-bağlantı elemanlarının nedensellikleri de belli kurallara bağlıdır. 0-bağlantı elemanı için herhangi bir bağlaçtaki çaba değişkeni giriş ise, diğer çaba değişkenleri çıkış olarak alınmalıdır. Benzer şekilde 1-bağlantı elemanı için herhangi bir bağlaçtaki akış değişkeni giriş ise, diğer akış değişkenleri çıkış olarak alınmalıdır (Şekil 2.6).

Bir sistemin bağlaç diyagramı modeli elde edildikten sonra nedensellik belirlemesi yapılırken öncelikle enerji veren elemanlar (Se ve Sf) ile enerji depolayan elemanlar (I ve C) göz önüne alınmalıdır. Direnç (R) elemanının nedensellik seçimi serbesttir ve bağlı bulunduğu bağlantı elemanının ve diğer elemanların nedenselliklerine göre tayin yapılır.



Şekil 2.6. (a) 0- ve (b) 1-bağlantı elemanlarının nedensellik tanımları

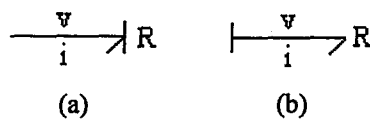
Bu tezde çoğunlukla elektriksel sistemlerle ilgilenildiğinden, bundan sonra bağlaç diyagramı değişkenlerinin genel tanımlamaları yerine elektriksel karşılıkları kullanılacaktır. Bu durumda çaba, akış, genelleştirilmiş momentum ve genelleştirilmiş yer değiştirme yerine, yazıldığı sıraya göre ve verilen sembollerle birlikte elektriksel karşılıkları olan gerilim (v), akım (i), akı (λ) ve yük (q) değişkenleri kullanılacaktır. Ayrıca bağlaç diyagramı elemanlarından atalet, çaba kaynağı ve akış kaynağı yerine de indüktans (L), gerilim kaynağı (GK) ve akım kaynağı (AK) ifadeleri kullanılacaktır.

2.4.1. Bir Kapılı Elemanlar

Bağlaç diyagramı metodunda bir kapılı elemanlar direnç, kapasitör, indüktans ile gerilim ve akım kaynaklarıdır. Bir kapılı elemanlar enerji harcayan, depolayan ve sisteme enerji veren olmak üzere üç ayrı kategoride incelenebilir. İdeal direnç, gerilim ile akım değişkenleri arasında statik bir ilişki kuran ve sisteme verilen enerjiyi harcayan bir elemandır. Bağlaç diyagramı tekniğindeki direnç gösterimi Şekil 2.7'de verilmiştir. Lineer bir direnç elemanı için gerilim ile akım değişkenleri arasındaki ilişki lineerdir ve aralarındaki oran R katsayısı ile verilir. Şekil 2.7a'daki nedenselliğe göre Denklem (2.3), Şekil 2.7b'deki nedenselliğe göre ise Denklem (2.4) geçerlidir.

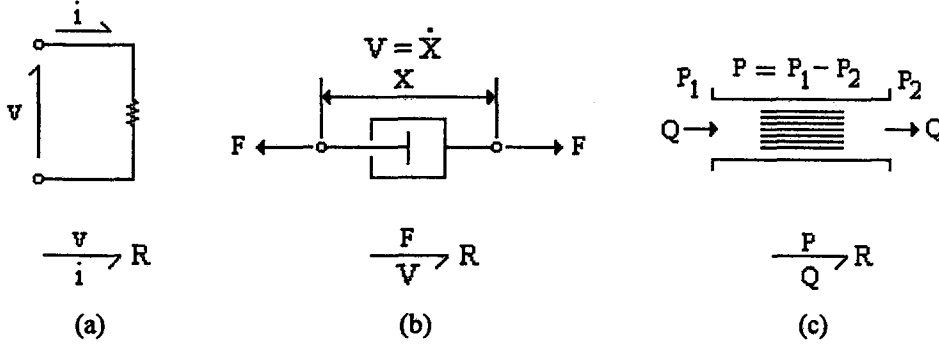
$$i = \frac{1}{R} \cdot v \quad (2.3)$$

$$v = R \cdot i \quad (2.4)$$



Şekil 2.7. (a), (b) Direncin bağlaç diyagramı gösterimi ve nedensellik tanımları

Direncin nedensellik belirlemesi için herhangi bir sınırlama yoktur. Yani her iki nedensellik durumu da mümkündür ve sistemi oluşturan diğer bağlaç diyagramı elemanlarının nedensellik durumlarına göre belirlenir. Direnç elemanının farklı enerji domenlerindeki karşılığı Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8. Direncin farklı enerji domenlerindeki karşılığı (a) Elektriksel (b) Mekanik (c) Hidrolik

Bağlaç diyagramı tekniğinde kapasitör ve indüktans elemanı, enerji depolayan elemanlardır. Kapasitörün bağlaç diyagramı tekniğindeki gösterimi Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. (a), (b) Kapasitörün bağlaç diyagramı gösterimi ve nedensellik tanımları

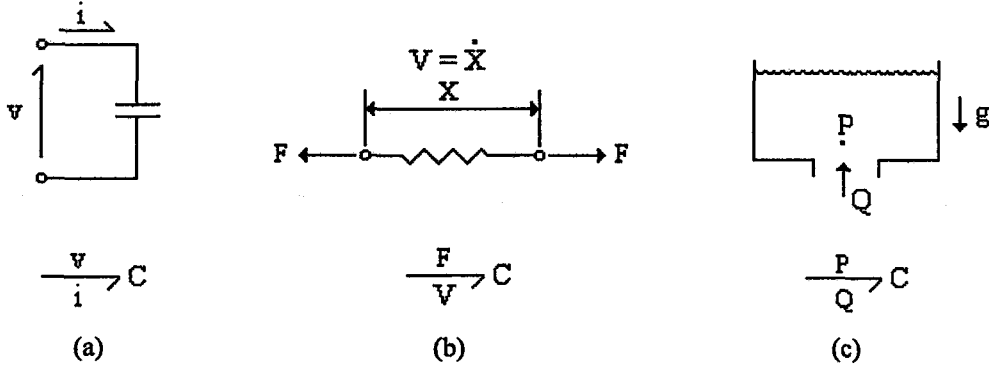
İdeal kapasitör elemanı, gerilim ve yük değişkenleri arasında,

$$v = f_c(q) \quad (2.5)$$

gibi lineer bir bağıntının bulunduğu elemandır. Kapasitör için nedensellik tayini Şekil 2.9a ve b’deki gibi yapılabilir. Şekil 2.9a’daki nedensellik integral nedenselliği, Şekil 2.9b’deki nedensellik ise türev nedenselliği olarak adlandırılır. Kapasitör elemanı için nedensellik tayini, integral nedenselliğine sahip olacak şekilde yapılmalıdır. Bu tayin mümkün olmadığında diğer tür nedensellik tayini de yapılabilir, ama integral nedenselliği öncelikli tercih olmalıdır. İntegral nedenselliğine ve türev nedenselliğine sahip bir kapasitör elemanı için gerilim ve akım değişkenleri arasındaki ilişki Denklem (2.6) ve (2.7) ile verilmektedir. Şekil 2.10’da kapasitör elemanının farklı enerji domenlerindeki karşılığı görülmektedir.

$$v(t) = v(t_0) + \frac{1}{C} \cdot \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (2.6)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i(t) \quad (2.7)$$



Şekil 2.10. Kapsitörün farklı enerji domenlerindeki karşılığı (a) Elektriksel (b) Mekanik (c) Hidrolik

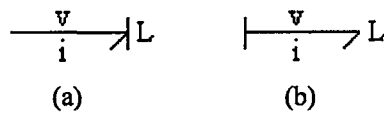
Bir diğer enerji depolayan eleman da indüktans elemanıdır. İdeal indüktans elemanı, akım ile akı değişkenleri arasında,

$$i = f_L(\lambda) \quad (2.8)$$

gibi lineer bir bağıntının olduğu elemandır. İndüktans elemanının bağlaç diyagramı tekniğindeki gösterimi Şekil 2.11'de görülmektedir. Bu eleman için de Şekil 2.11a'da verilen integral nedenselliği öncelikle tercih edilmelidir. Bağlaç diyagramı modelinde bu tür bir nedensellik tayini sistemin yapısından dolayı mümkün olmuyorsa, diğer şekilde de yapılabilir. İntegral nedenselliğine ve türev nedenselliğine sahip bir indüktans elemanı için, Denklem (2.9) ve (2.10)'daki bağıntılar geçerlidir.

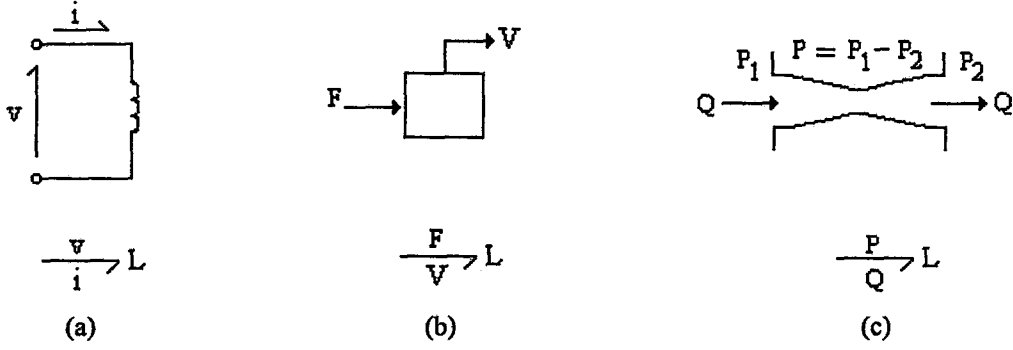
$$i(t) = v(t_0) + \frac{1}{L} \cdot \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \quad (2.9)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} \cdot v(t) \quad (2.10)$$



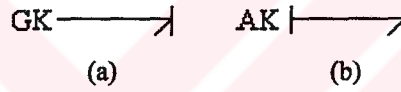
Şekil 2.11. (a), (b) İndüktansın bağlaç diyagramı gösterimi ve nedensellik tanımları

İndüktansın farklı enerji domenlerindeki karşılığı ise Şekil 2.12'de görülmektedir.



Şekil 2.12. İndüktansın farklı enerji domenlerindeki karşılığı (a) Elektriksel (b) Mekanik (c) Hidrolik

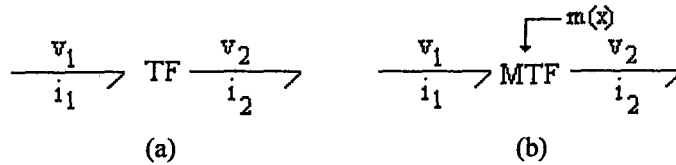
Bir kapılı elemanların diğer bir sınıfını da enerji veren elemanlar oluşturmaktadır. Gerilim ve akım kaynakları sisteme enerji veren elemanlardır. İdeal bir gerilim kaynağı akım bileşeninden bağımsız olup bu tezde GK ile, akım kaynağı ise gerilim bileşeninden bağımsız olup AK ile gösterilmiştir. Gerilim ve akım kaynaklarının bağlaç diyagramı gösterimleri Şekil 2.13'deki gibi olup bu elemanların nedensellik tanımları standarttır.



Şekil 2.13. (a) Gerilim ve (b) akım kaynağının bağlaç diyagramı gösterimi ve nedensellik tanımları

2.5. İki Kapılı Elemanlar

Karmaşık yapıli sistemlerde birden fazla enerji modu bulunduğunda, aynı anda birden fazla enerji dönüşümü olabilir. Bu tür sistemlerde, bir enerji modundan diğer enerji moduna enerji aktarımı vardır. Enerji aktarımında sistem değişkenleri belli oranda aynı değişkenlere dönüşüyorsa, böyle bir fiziksel aktarım elemanına fiziksel transformatör adı verilir. Transformatör elemanı ile ifade edilen enerji aktarımı sistemdeki başka bir kapı tarafından kontrol edildiğinde, böyle bir değişim bağlaç diyagramı tekniğinde MTF ile gösterilir ve her iki elemanın bağlaç diyagramı gösterimi Şekil 2.14'de görülmektedir.



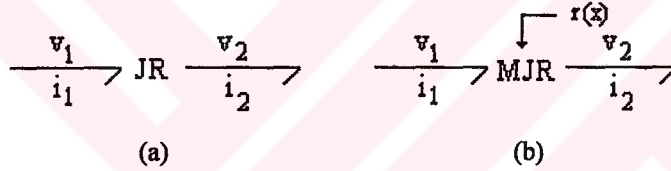
Şekil 2.14. (a) Transformatör ve (b) modüle transformatörün bağlaç diyagramı gösterimi

Transformatörün tanım bağıntısı Denklem (2.11)'de verilmiştir. Burada m dönüştürme oranıdır. Bu elemana elektriksel trafuyu, kaldırıcı ve dişli takımlarını örnek olarak verebiliriz.

$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_2(t) \\ i_1(t) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Bağlaç diyagramı tanımında, iki kapılı dönüştürücü olan diğer bir eleman da fiziksel jiratördür. Sistem değişkenleri bir enerji modundan diğerine aktarılırken gerilim değişkenleri ile akım değişkenleri arasında çaprazlama bir değişim oluyorsa, bu tip bir ilişki bağlaç diyagramı tekniğinde fiziksel jiratör elemanı ile ifade edilir. Transformatördeki gibi jiratörde de enerji aktarımı sistemdeki başka bir kapı tarafından kontrol edilebilir. Böyle bir değişim bağlaç diyagramı tekniğinde MJR ile gösterilir ve Şekil 2.15’de her iki elemanın bağlaç diyagramı gösterimi verilmiştir. Jiratöre ait tanım bağıntıları Denklem (2.12)’de verilmiştir. Burada r aktarım oranıdır. DC motor ve hidrolik pompayı jiratöre örnek olarak verebiliriz.

$$\begin{bmatrix} v_2(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r \\ 1/r & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1(t) \\ i_1(t) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$



Şekil 2.15. (a) Jiratör ve (b) modüle jiratörün bağlaç diyagramı gösterimi

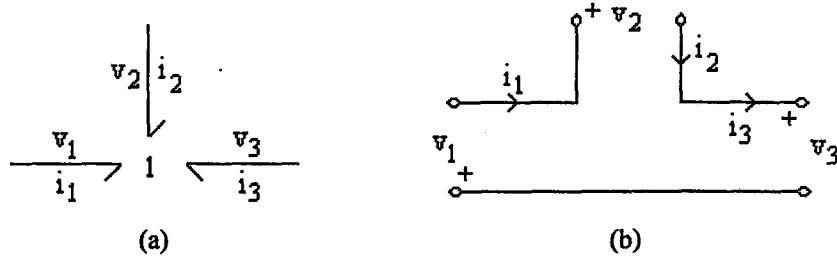
2.6. Çok Kapılı Elemanlar

Çok kapılı elemanlar, bağlaç diyagramı tekniğinde bağlantı elemanı olarak da isimlendirilirler. Seri (1-bağlantı elemanı, 1-kapısı) ve paralel (0-bağlantı elemanı, 0-kapısı) çok kapılılar olmak üzere iki türü vardır. Seri çok kapılıda akım değişkenleri birbirine eşittir ve kapıya bağlı olan bağlaçların gerilim değişkenlerinin toplamı sıfırdır (Şekil 2.16).

Seri çok kapılılar bağlaç diyagramı tekniğinde “1” veya “s” ile sembolize edilir. Şekil 2.16’daki seri çok kapılı için (2.13) ve (2.14)’deki matematiksel bağıntılar geçerlidir.

$$i_1(t) = i_2(t) = i_3(t) \quad (2.13)$$

$$v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) = 0 \quad (2.14)$$



Şekil 2.16. Seri çok kapılının (a) bağlaç diyagramı gösterimi ve (b) elektriksel karşılığı

n tane bağlacın bağlı olduğu seri çok kapılı için ise;

$$i_1(t) = i_2(t) = \dots = i_n(t) \quad (2.15)$$

$$\sum_{j=1}^n v_j(t) = 0 \quad (2.16)$$

bağıntıları geçerlidir.

Paralel çok kapılı eleman ise kapıdaki bağlaçların gerilim değişkenlerinin birbirine eşit olduğu ve akım değişkenlerinin de toplamının sıfır olduğu bir elemandır. “0” veya “p” ile gösterilir. Şekil 2.17’deki paralel çok kapılı için;

$$v_1(t) = v_2(t) = v_3(t) \quad (2.17)$$

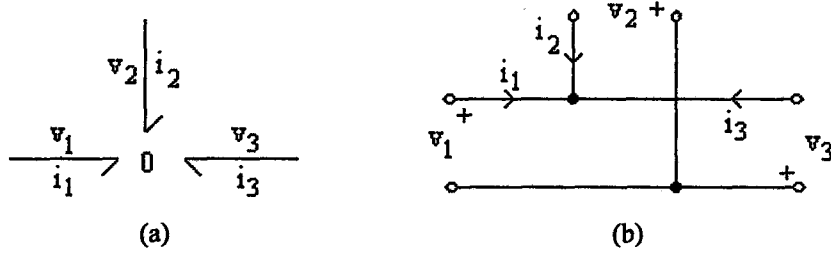
$$i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0 \quad (2.18)$$

olur. n tane bağlacın bağlı olduğu paralel çok kapılı için;

$$v_1(t) = v_2(t) = \dots = v_n(t) \quad (2.19)$$

$$\sum_{j=1}^n i_j(t) = 0 \quad (2.20)$$

olur. Şekil 2.16b ve 2.17b’de 0- ve 1-kapılarının elektriksel anlamı görülmektedir. Bu kısımdan itibaren seri çok kapılı, 1-kapısı, paralel çok kapılı ise, 0-kapısı olarak anılacaktır.



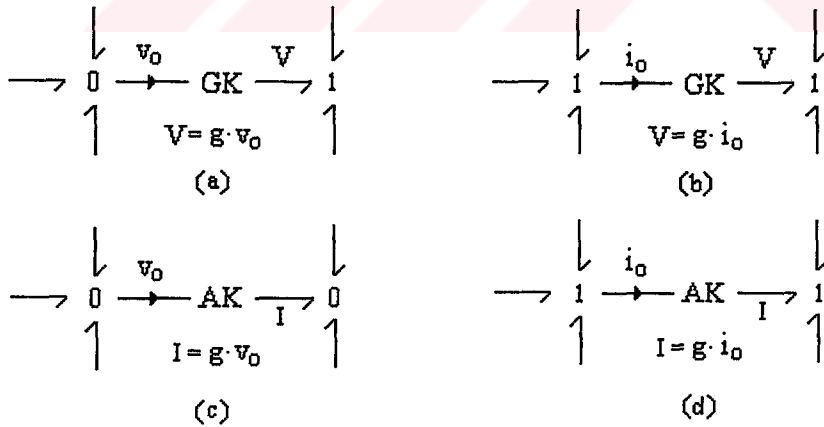
Şekil 2.17. Paralel çok kapılının (a) bağlaç diyagramı gösterimi ve (b) elektriksel karşılığı

Bütün bağlaç diyagramı elemanlarının gösterimleri, nedensellik tanımları ve matematiksel bağıntıları en genel haliyle Tablo 2.2’de verilmiştir [5].

2.7. Bağımlı Kaynakların Bağlaç Diyagramı Modeli

Elektrik devrelerinde bağımlı kaynaklar, devredeki herhangi bir akımın yada gerilimin etkilediği türde kaynaklardır. Bir bağımlı gerilim kaynağının gerilimi sistemde uzak bir noktadaki diğer bir akım veya gerilim tarafından etkilendiğinde, bu etki tek yönlüdür ve bir sinyal yoluyla olur. Bu nedenle daha önce tarif edilen aktif bağlacın, bu tür elemanların modellerini elde etmek için kullanılması gerekmektedir.

Elektrik devrelerindeki bağımlı kaynak türleri, aynı zamanda bağlaç diyagramı tekniğinde de bulunabilecek bağımlı kaynaklardır. Şekil 2.18’de bağımlı akım ve bağımlı gerilim kaynaklarının bağlaç diyagramı tekniğindeki modellenmesi görülmektedir.



Şekil 2.18. Bağımlı kaynakların bağlaç diyagramı gösterimleri (a) Gerilim kontrollü gerilim kaynağı (b) Akım kontrollü gerilim kaynağı (c) Gerilim kontrollü akım kaynağı (d) Akım kontrollü akım kaynağı

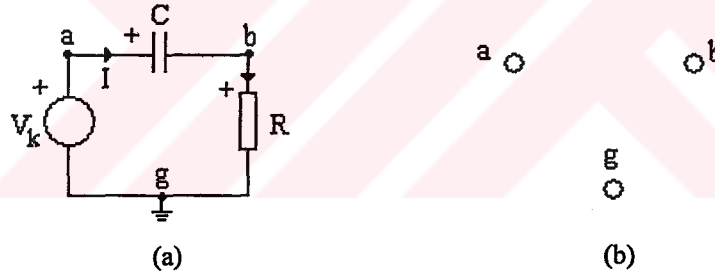
Tablo 2.2 Bağlaç diyagramı elemanlarının gösterimleri, nedensellik tanımları ve matematiksel ifadeleri

Bileşen	Bağlaç Diyagramı Gösterimi	Nedensellik Tanımları	Matematiksel İfadeler
Çaba Kaynağı	$S_e \longrightarrow$	$S_e \longrightarrow \nearrow$	$e(t)=E(t)$
Akış Kaynağı	$S_f \longrightarrow$	$S_f \longleftarrow \nearrow$	$f(t)=F(t)$
Direnç	$\longrightarrow R$	$\longleftarrow R$ $\longrightarrow \nearrow R$	$e(t) = R \cdot f(t)$ $f(t) = \frac{1}{R} \cdot e(t)$
Kapasitör	$\longrightarrow C$	$\longleftarrow C$ $\longrightarrow \nearrow C$	$e(t) = e(t_0) + \frac{1}{C} \cdot \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau$ $\frac{de(t)}{dt} = \frac{1}{C} \cdot f(t)$
Atalet	$\longrightarrow I$	$\longleftarrow I$ $\longrightarrow \nearrow I$	$\frac{df(t)}{dt} = \frac{1}{I} \cdot e(t)$ $f(t) = f(t_0) + \frac{1}{I} \cdot \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau$
Transformatör	$\xrightarrow[f_1]{e_1} TF \xrightarrow[f_2]{e_2}$	$\xrightarrow[f_1]{e_1} TF \xrightarrow[f_2]{e_2}$ $\xrightarrow[f_1]{e_1} \nearrow TF \xrightarrow[f_2]{e_2}$	$\begin{bmatrix} e_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_2(t) \\ f_1(t) \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} f_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/m & 0 \\ 0 & 1/m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_2(t) \\ e_1(t) \end{bmatrix}$
Jirator	$\xrightarrow[f_1]{e_1} JR \xrightarrow[f_2]{e_2}$	$\xrightarrow[f_1]{e_1} JR \xrightarrow[f_2]{e_2}$ $\xrightarrow[f_1]{e_1} \nearrow JR \xrightarrow[f_2]{e_2}$	$\begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r \\ r & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/r \\ 1/r & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix}$
0-kapısı	$\xrightarrow[f_1]{e_1} 0 \xleftarrow[f_3]{e_3}$ $e_2 \uparrow f_2$	$\xrightarrow[f_1]{e_1} 0 \xleftarrow[f_3]{e_3}$ $e_2 \uparrow f_2$	$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t)$ $f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) = 0$
1-kapısı	$\xrightarrow[f_1]{e_1} 1 \xleftarrow[f_3]{e_3}$ $e_2 \uparrow f_2$	$\xrightarrow[f_1]{e_1} 1 \xleftarrow[f_3]{e_3}$ $e_2 \uparrow f_2$	$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t)$ $e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0$

2.8. Bağlaç Diyagramı Modelinin Elde Edilişi

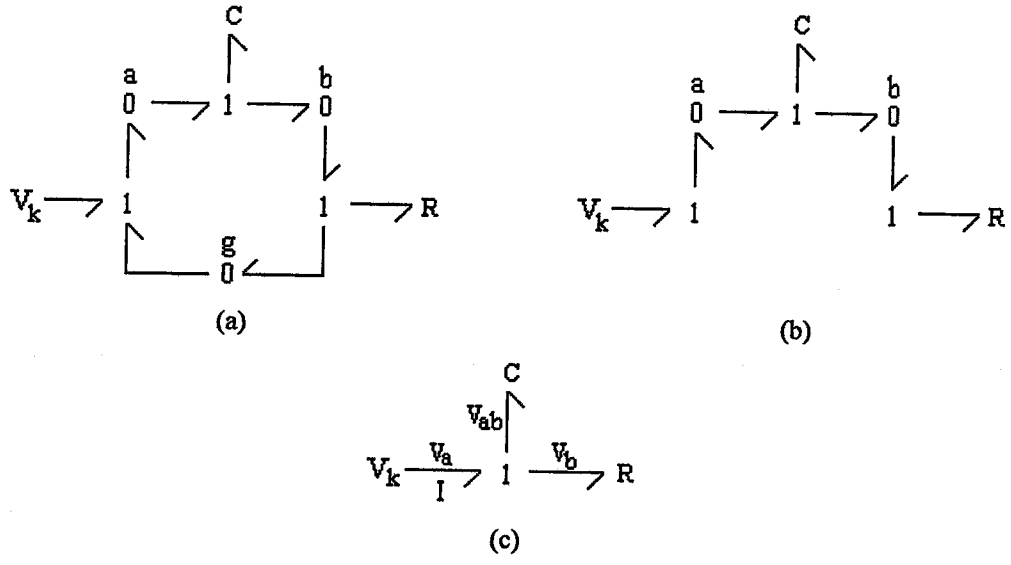
Dinamik bir sistemin bağlaç diyagramı modeli belirli aşamalar takip edilerek elde edilir. Öncelikle sistemdeki bütün elemanlar bağlaç diyagramı tekniğindeki karşılıklarıyla ifade edilirler. Daha sonra bu elemanlar gerilim ve akım değişkenlerinin durumuna göre 0- ve 1-kapılarıyla birbirine bağlanır. Son olarak her bağlaç için öngörülen nedensellik tanımlamaları kullanılarak sistemin bağlaç diyagramı elde edilir. Nedensellik belirleme aşamasında daha önceden belirtildiği gibi ilk olarak kaynaklar ele alınır. Daha sonra seri ve paralel çok kapılıların nedenselliklerine uygun olmak üzere kapasitör ve indüktans elemanları integral nedenselliğine sahip olacak şekilde seçilmeye çalışılır. Direnç elemanlarının nedenselliği belirlenerek bağlaç diyagramı modeli son halini alır.

Elektriksel bir devrenin bağlaç diyagramı modeli oluşturulurken farklı potansiyeldeki düğümler için 0-kapısı yerleştirilir. Bu elemanlar arasına 1-kapıları konur ve bağlaçlar yardımıyla diğer elemanlar (R, L, C, GK, AK) bağlanır. Bağlaların yönü tayin edilerek, devre görülebilen bir sıfır potansiyeline sahipse bunu temsil eden 0-kapısı ve buna bağlı olan bütün bağlaçlar diyagramdan çıkartılır. Devrede görülebilen bir sıfır potansiyeli yoksa bu işlem herhangi bir 0-kapısı için yapılır ve diyagram sadeleştirilir.



şekil 2.19. (a) Örnek devre ve (b) devrenin düğüm noktalarının gösterimi

şekil 2.19a'daki basit bir örnek devre için bağlaç diyagramı modelinin elde edilişi şekil 2.20'de verilmiştir. Öncelikle şekil 2.19b'deki gibi örnek devrenin düğüm noktaları belirlenir. Daha sonra düğüm noktaları arasındaki C ve R elemanları 1-kapıları ile bağlanır (şekil 2.20a). Devredeki g noktası görünebilen bir sıfır potansiyelidir ve bu 0-kapısı ile bu kapıya bağlı bütün bağlaçlar modelden çıkartılır (şekil 2.20b). Son olarak da gerekli sadeleştirmeler yapılarak model oluşturulur (şekil 2.20c).



Şekil 2.20. (a), (b), (c) Şekil 2.19'daki devrenin bağlaç diyagramı modelinin adım adım elde edilişi

3. LİNEER OLMAYAN ELEMANLARIN BAĞLAÇ DİYAGRAMI MODELLERİ

3.1. Giriş

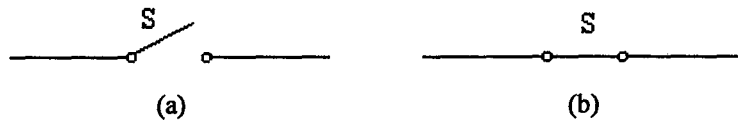
Lineer olmayan sistemlerin analizinde kullanılan yöntemlerden birisi de parça-parça lineerlik yaklaşımıdır. Bu yaklaşımla sistemdeki lineer olmayan ve/veya dışarıdan kontrollü elemanlar, lineer elemanlar ve anahtarlar kullanılarak modellenir. Sistemdeki anahtarların bazılarının açık bazılarının da kapalı olmaları sonucunda oluşan durum, parça-parça lineer veya dışardan kontrollü elemanların her bir lineer bölgesine karşılık gelmektedir.

Bu bölümde, parça-parça lineerlik yaklaşımı kullanılarak bazı elektronik devre elemanları ile lineer olmayan direnç, kapasitör ve indüktans elemanlarının modellenmesi EDAP Matrisi ve kontrol eşitsizlikleri ile birlikte verilecektir.

3.2. Anahtarlar

Son yıllarda elektronik ve güç elektroniği endüstrisindeki gelişmeler sonucunda anahtarlar en çok kullanılan devre elemanlarından birisi olmuştur. Parça-parça lineerlik yaklaşımının kullanılmasıyla birlikte yarı iletken elemanlar ve lineer olmayan karakteristiğe sahip elemanlar, anahtarlar ve lineer elemanlarla modellenebilmektedir. Bu da anahtarın bir devre elemanı olarak önemini artırmaktadır. Farklı domenlerde elektriksel anahtarın eşdeğeri olan elemanlar da bulunmaktadır. Hidrolik sistemlerde kullanılan basınç tahliye valfini örnek olarak verebiliriz. Bu çalışmada çoğunlukla elektriksel sistemler ele alındığından elektriksel anahtar üzerinde durulacaktır. Farklı domenler için de elektriksel eşdeğeri kullanılabilir.

İdeal olmayan anahtar açık durumdayken büyük bir direnç, kapalı durumdayken ise küçük bir direnç gösteren iki uçlu bir elemandır. Bu dirençler anahtarın iletim ve kesim dirençleri olarak adlandırılır. İdeal bir anahtarın direnci ise açık durumda sonsuz, kapalı durumda ise sıfırdır. İdeal bir anahtarın açık ve kapalı durumdaki gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. İdeal anahtarın (a) açık ve (b) kapalı durumdaki gösterimi

Bir anahtarın durumu anahtarlama fonksiyonu ile tanımlanır. Anahtarlama fonksiyonu $s(t)$ olmak üzere;

$$s(t) = \begin{cases} 1, & \text{anahtar kapalı ise} \\ 0, & \text{anahtar açık ise} \end{cases}$$

olur. $\bar{s}(t)$ ise $s(t)$ ile zıt fazda çalışan bir anahtarın anahtarlama fonksiyonunu gösterir. Bu iki anahtarlama fonksiyonu arasındaki ilişki,

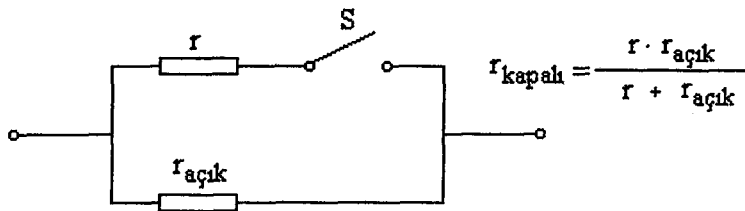
$$s(t) = 1 - \bar{s}(t) \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır. Eğer anahtarlama fonksiyonu Denklem (3.2)'de verildiği gibi T periyodu ile periyodikse bu anahtara Periyodik Çalışan Anahtar denir [20].

$$s(t) = s(t + T) \quad (3.2)$$

Uygulamada ikiden fazla durumlu veya ikiden fazla uçlu anahtarlarla da karşılaşılabilir. Bu anahtarlar, sadece iki ucu bulunan ve uygun anahtarlama fonksiyonuna sahip olan anahtarlar içeren modeller yardımıyla simüle edilebilirler.

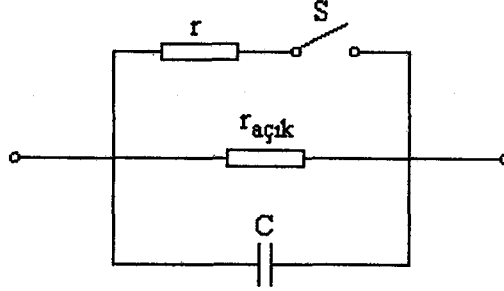
İdeal olmayan bir anahtarın açık ve kapalı olduğu durumlarda sahip olduğu dirençler sırasıyla $r_{\text{açık}}$ ve $r_{\text{kapalı}}$ olmak üzere, eşdeğer devresi Şekil 3.2'de verilmiştir. İdeal olmayan anahtar da diğer lineer olmayan elemanlar gibi ideal anahtar ve lineer devre elemanları ile modellenebilmektedir.



Şekil 3.2. İdeal olmayan bir anahtarın eşdeğer devresi

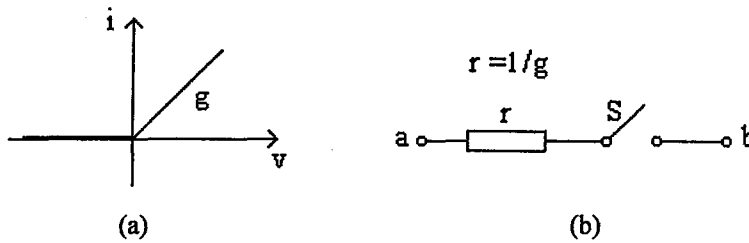
Pratikte bir anahtarın bir durumdan diğer bir duruma geçiş süresi sıfır değildir. Bu nedenle her zaman için açık ve kapalı durumlarına ek olarak bir de geçiş durumu göz önüne alınmalıdır. Geçiş durumları ile ilgili olarak yükselme ve düşme zamanları tanımlanır. Yarı

iletken anahtarlar için sıfırdan farklı olan geçiş zamanlarını temsil etmek üzere bu elemanın ideal anahtar içeren eşdeğer devresinde, açık durum direncine paralel olarak küçük bir kapasite konulabilir. Pratikte kullanılan anahtarlarda bu durum çalışma periyodu, kaynak ve empedans seviyelerine bağlıdır [20]. Bu duruma ilişkin yeni eşdeğer devre Şekil 3.3’de görülmektedir.



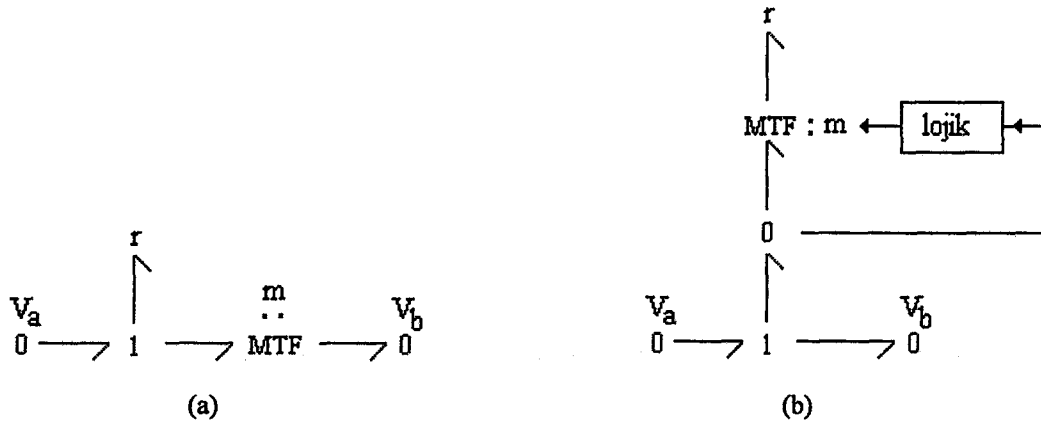
Şekil 3.3. İdeal olmayan anahtar için diğer bir eşdeğer devre

Bağlaç diyagramı tekniğinde anahtar tanımı farklı yöntemlerle yapılmıştır. Bazı yazarlar bağlaç diyagramı tekniğinde anahtarı MTF ye seri bağlı bir dirençle tanımlamıştır. MTF nin modülasyon oranı anahtarın durumuna göre iki farklı değer (anahtar açık iken 0, kapalı iken 1) almaktadır. Anahtarı MTF ye seri bağlı bir direnç ile modelleme işlemi iki farklı yaklaşımla yapılmıştır. Bu yaklaşımlar arasındaki farkı görebilmek için, önce Şekil 3.4’de karakteristiği ve eşdeğer devresi verilen eleman ele alınmıştır. Şekil 3.4b’deki eşdeğer devre için Şekil 3.5a’da görülen Castelain’ın önerdiği modelde, MTF ile ona seri bağlı olan direnç sisteme doğrudan bağlıdır [29]. Aynı eşdeğer devre için Şekil 3.5b’de görülen Ducreux’un modelinde ise MTF ile ona seri bağlı direnç sisteme ilave bir 0-kapısı yardımıyla bağlıdır [30]. Her iki model için de modülasyon oranı anahtar açık olduğunda 0 diğer durumda ise 1’dir.



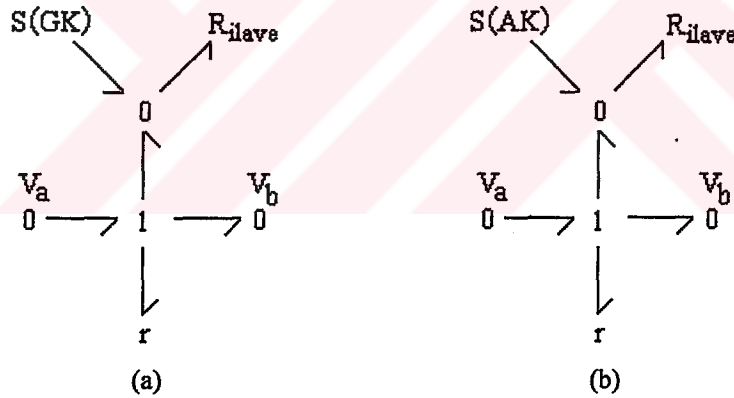
Şekil 3.4. Anahtar modelleri için örnek bir elemanın (a) karakteristiği (b) eşdeğer devresi

Her iki yaklaşımda da özellikle fazla sayıda anahtarın bulunduğu sistemlerde, eklenen MTF ve direnç elemanlarından dolayı modelin karmaşıklaşmasına neden olunmaktadır.



Şekil 3.5. Anahtarın MTF ve direnç ile modellenmesi (a) Castelain (b) Ducreux modeli

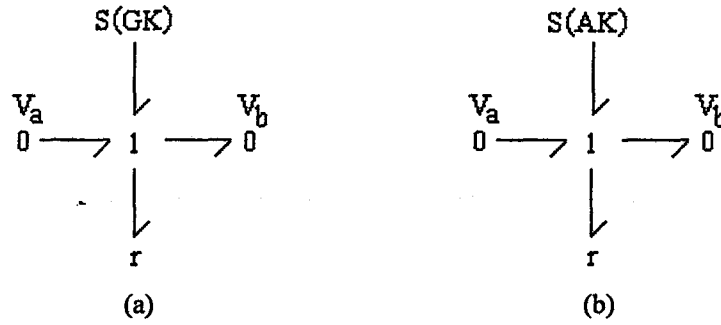
Bazı yazarlar ise bağlaç diyagramı tekniğinde anahtarı ideal akım (anahtar açık) ve gerilim (anahtar kapalı) kaynağı kullanarak modellemişlerdir [31]. Fakat bazı elemanların nedenselliklerini garanti etmek için ilave bir 0-kapısı ve bu kapaıya ilave bir direnç eklemek zorunda kalmışlardır. Bu tanımlamanın Şekil 3.4b'deki eşdeğer devre için kullanılmasıyla oluşan bağlaç diyagramı modeli Şekil 3.6'da verilmiştir. Modele eklenen ilave direncin değeri istenildiği gibi seçilebilir.



Şekil 3.6. Anahtarın ilave bir 0-kapısı ve direnç ile modellenmesi (a) anahtar kapalı (b) anahtar açık

Yukarıdaki tanımlara göre modelleme ve simülasyonda anahtarların farklı her pozisyonu için farklı bağlaç diyagramı modeli kullanılması zorunludur. Bu da karmaşıklığa neden olabilmektedir. Bağlaç diyagramı tekniğinde, hem modeli karmaşıklştırmayan hem de formülasyon ve çözüm aşamasında bilgisayar belleği ve zamanının ekonomik biçimde kullanılmasını sağlayan, fiziksel sisteme daha uygun yeni bir anahtar tanımı verilmiştir [33]. Bu tanımda anahtarlar ilave bir 0-kapısı ve bu kapaıya bağlı bir direnç eklemeksizin değerleri sıfır olan ideal akım (anahtar açık) ve ideal gerilim kaynağı (anahtar kapalı) kullanılarak

modellenmiştir. Şekil 3.7’de bu tanımlamanın Şekil 3.4b’deki eşdeğer devreye uygulanmasıyla elde edilen bağlaç diyagramı modeli görülmektedir.



Şekil 3.7. Anahtarın ideal gerilim ve ideal akım kaynağı ile modellenmesi
(a) anahtar kapalı (b) anahtar açık

Bu çalışmada bağlaç diyagramı gösteriminde ideal anahtarı simgelemek için “S” harfi kullanılmış ve modelde standart bağlaç diyagramı elemanı gibi gösterilmiştir. Anahtarlar ideal gerilim ve ideal akım kaynağı ile modellendiğinden bağlacın yönü kaynakların yönünün aynısıdır. Elemanın modelindeki anahtar/anahtarların açık ya da kapalı oluşu ise bu Bölümde anlatılacak olan EDAP Matrisi ile tarif edilmektedir.

3.3. Eleman Durumu-Anahtar Pozisyonu (EDAP)

Lineer olmayan bir elemanın karakteristiğine parça-parça lineerlik yaklaşımı uygulandığında, karakteristikteki her bir lineer bölge bir eleman durumunu gösterir. Lineer olmayan elemanın modellenmesi sonucu, lineer elemanlar ve ideal anahtarlardan oluşan eşdeğer devre oluşturulur. Burada elemanların durumlarına göre anahtarların farklı pozisyonlarını gösteren matrise Eleman Durumu-Anahtar Pozisyonu (EDAP) Matrisi adı verilir.

EDAP Matrisi sayısı sistemdeki lineer olmayan eleman sayısına eşittir. Boyutları ise lineer olmayan elemanın bulunduğu durum sayısı ve eşdeğer devresindeki anahtar sayısı ile belirlenir:

n_{ed}^i : i. eleman için durum sayısı

n_s^i : i. eleman için anahtar sayısı

olmak üzere i. eleman için EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP}^i = \left[\left(m_{EDAP}^i \right)_{k,l} \right]_{n_{ed}^i, n_s^i} \quad (3.3)$$

şeklindedir ve $(m_{EDAP}^i)_{k,l}$, i. elemanın, k. durumunda, l. Anahtar pozisyonunu gösterir.

$$M_{EDAP}^i = \begin{cases} 0, & \text{k.durumda l. anahtar açık ise} \\ 1, & \text{k.durumda l. anahtar kapalı ise} \end{cases}$$

olur. Burada $k=1,2,\dots, n_{ed}^i$ ve $l=1,2,\dots, n_s^i$ dir.

3.4. Kontrol Eşitsizlikleri

Lineer bir devreyi oluşturan elemanların matematik modellerinde uç denklemleri elemanları tanımlamak için yeterlidir. Ancak, lineer olmayan bir eleman parça-parça lineer elemanlar ve anahtarlarla (eşdeğer devresi ile) modellendiğinde matematik modellerde eşdeğer devre elemanlarının uç denklemlerine ek olarak kontrol eşitsizliklerinin de kullanılması gereklidir. Uç denklemleri ve/veya eşdeğer devreleri aynı fakat kontrol eşitsizlikleri farklı olan elemanlar farklı davranış gösterirler.

Eleman durumlarını belirlemede kullanılan denklemlere kontrol eşitsizlikleri denir. i. elemanın j. durumuna ilişkin kontrol eşitsizlikleri;

$$L_j^i \cdot y_j^i(t) \geq R_j^i \quad (3.4)$$

biçiminde yazılır. Burada L_j^i matrisi, $n_j^i \cdot m_j^i$ boyutunda olup durum değişimine neden olan uç büyüklüklerinden oluşan $y_j^i(t)$ vektörüne ilişkin katsayıları içerir.

n_j^i : i. elemanın j. durumunun kontrol eşitsizliği sayısı

m_j^i : $y_j^i(t)$ vektörünün boyutu

olmak üzere,

$$L_j^i = \left[\left(l_{i,j}^j \right)_{k,l} \right]_{n_j^i, m_j^i}, \quad \left(l_{i,j}^j \right)_{k,l} \in \mathbb{R} \quad (3.5)$$

dir. R_j^i vektörü, n_j^i boyutunda olup uç büyüklüklerinin durum değişimine neden olan referans değerlerini gösterir.

$$R_j^i = \left(r_j^i \right)_{k, n_j^i}, \quad \left(r_j^i \right)_{k, l} \quad (3.6)$$

i. elemanın eleman durumları için kontrol eşitsizliği sayısının birden fazla olması durumunda bunların birbirine VE ile mi yoksa VEYA ile mi bağlı olduğunu gösterebilmek için Z^i matrisi tanımlanmıştır. i. elemana ilişkin bilgileri içeren Z^i matrisi

$$Z^i = \left[\left(z^i \right)_{l, k} \right]_{n_d^i, \max_j(n_j^i)}, \quad \left(z^i \right)_{l, k} \in \{0, 1, 2\} \quad (3.7)$$

olur. Burada n_d^i : i. elemandaki durum sayısıdır. i. elemana ilişkin bilgileri içeren Z^i matrisinde, l. eleman durumuna ilişkin kontrol eşitsizliklerinin birbiriyle olan mantıksal ilişkileri;

$$\left(z^i \right)_{l, k} = \begin{cases} 0 & (k+1). \text{kontrol eşitsizliği mevcut değilse} \\ 1 & k. \text{ ve } (k+1). \text{kontrol eşitsizlikleri birbirine VE bağlacı ile bağlı ise} \\ 2 & k. \text{ ve } (k+1). \text{kontrol eşitsizlikleri birbirine VEYA bağlacı ile bağlı ise} \end{cases}$$

şeklinde gösterilir. Burada $k = 1, 2, \dots, \max_j(n_j^i)$ şeklindedir.

Yukarıdaki tanımlamalar parça-parça lineer elemanlar için yeterlidir. Eğer bu elemanlar aynı zamanda dışardan da kontrol ediliyorsa, eleman durumlarının belirlenmesinde bunun da dikkate alınması gerekir. Kontrol eşitsizliklerinin yanı sıra bu etkilerin zaman değerlerinin de bilinerek kontrol edilmesi gerekir. Bu nedenle elemanların hangi durumlarının zamanla ilgili olduğunu gösteren bir F^i vektörü,

$$F^i = \left[\left(f^i \right)_j \right]_{n_d^i}, \quad \left(f^i \right)_j \in N \quad (3.8)$$

$$\left(f^i \right)_j = \begin{cases} 0, i. \text{ elemanın } j. \text{ durumu zamanla ilgili değil ise (zamanla kontrol edilmiyor ise)} \\ n, i. \text{ elemanın } j. \text{ durumu bir peryotta n kez kontrol ediliyor ise (zamanla kontrollu ise)} \end{cases}$$

olarak tanımlanır. Burada $N = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ sayma sayıları kümesidir. Zamanla ilgili olan eleman durumlarına ilişkin zaman değerleri de T^i vektöründe toplanmıştır. Bu vektör,

$$T^i = \left[\begin{matrix} (t^i)_1 \\ \vdots \\ (t^i)_L \end{matrix} \right]_{L^i}, \quad L^i = \sum_{j=1}^{n_d^i} (f^i)_j, \quad (t^i)_{l \in R} \quad (3.9)$$

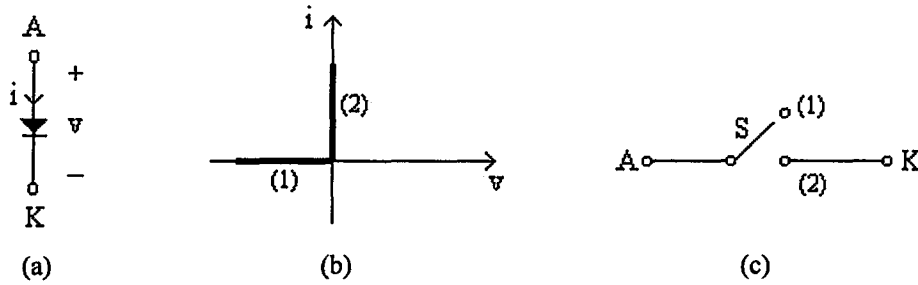
şeklinde dir. Zaman değ erleri, durum sırası takip edilerek ve her durum sırası için küçükten büyüğe sıralanır. Elemanın herhangi bir durumu zamanla ilgili değilse, o durum için T^i vektöründe yer ayrılmaz. Ancak bir elemanın hiçbir durumu zamanla ilgili değilse $T^i = [0]$ olarak alınır. Bu durumda F^i nin bütün elemanları 0 olacağından T^i nin 0 olarak yazılan bu elemanın bir önemi yoktur.

3.5. Lineer Olmayan Elemanların Parça-Parça Lineerlik Yaklaşımıyla Bağlaç Diyagramı Modelleri

Bu bölümde çeşitli lineer olmayan devre elemanlarının bağlaç diyagramı modelleri elde edilecektir. Bu modeller ideal anahtarlarla birlikte lineer devre elemanları ve sabit kaynaklar içerebilir.

3.5.1. Yarı İletken Elemanlar

Diyot: İdeal bir diyotun gösterimi, i-v karakteristiği (buradaki i akımı simgelemektedir) ve eşdeğ eri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. İdeal diyotun (a) gösterimi (b) i-v karakteristiği (c) eşdeğ eri

Şekil 3.8(b)’deki karakteristiğe göre EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Kontrol eşitsizlikleri:

1. durum için:

$$[-1] \cdot [v] \geq [0] \quad (3.10a)$$

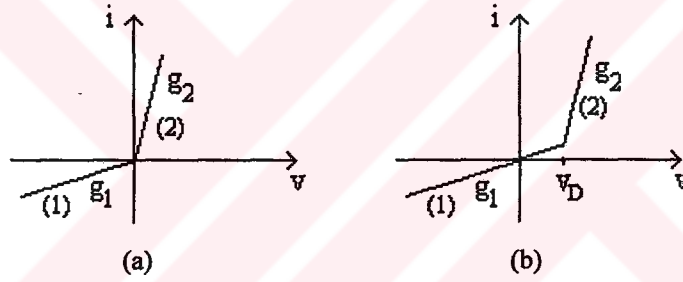
2. durum için:

$$[1] \cdot [v] \geq [0] \quad (3.10b)$$

Bu eleman için her iki durumda tek kontrol eşitsizliği geçerli olduğundan ve her iki durumun da zamanla ilgisi olmadığından,

$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = [0 \quad 0]$$

olur. Şekil 3.9'da eşik gerilimi sıfır ve V_D olan karakteristikler görülmektedir.



Şekil 3.9. Eşik gerilimi (a) sıfır ve (b) V_D olan diyotun i-v karakteristikleri

Şekil 3.9a'daki karakteristiğe sahip diyotun uç denklemleri:

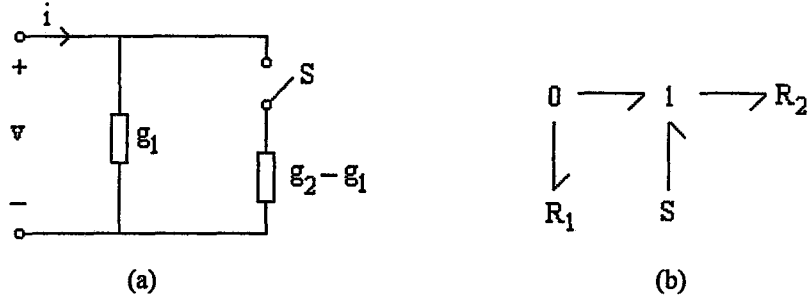
1. durum için:

$$i = g_1 \cdot v \quad (3.11a)$$

2. durum için:

$$i = g_2 \cdot v \quad (3.11b)$$

olup, $0 < g_1 < g_2$ dir. Buna göre oluşan eşdeğer devre ile bağlaç diyagramı modeli Şekil 3.10'da verilmiştir. Şekil 3.10b'deki bağlaç diyagramı modelinde $R_1 = 1/g_1$, $R_2 = 1/(g_2 - g_1)$ dir.



Şekil 3.10. Şekil 3.9a'daki karakteristiğe ilişkin (a) eşdeğer devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli

Bu elemanın EDAP Matrisi ideal diyotunki gibi olup, kontrol eşitsizlikleri:

1. durum için:

$$[-1] \cdot [v] \geq [0] \quad (3.11c)$$

2. durum için:

$$[1] \cdot [v] \geq [0] \quad (3.11d)$$

$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Şekil 3.9b'deki gibi eşik gerilimi sıfırdan farklı olan diyot için uç denklemleri:

1. durum için:

$$i = g_1 \cdot v \quad (3.12a)$$

2. durum için:

$$i = g_2 \cdot v - (g_2 - g_1) \cdot V_D \quad (3.12b)$$

olup eşdeğer devre iki farklı şekilde Şekil 3.11'deki gibi elde edilebilir. Bu iki eşdeğer devrenin de bağlaç diyagramı modelleri $R_1 = 1/g_1$, $R_2 = 1/(g_2 - g_1)$ olmak üzere aynı sırayla Şekil 3.12'de verilmiştir. EDAP Matrisi ideal diyottaki gibi olup, kontrol eşitsizlikleri:

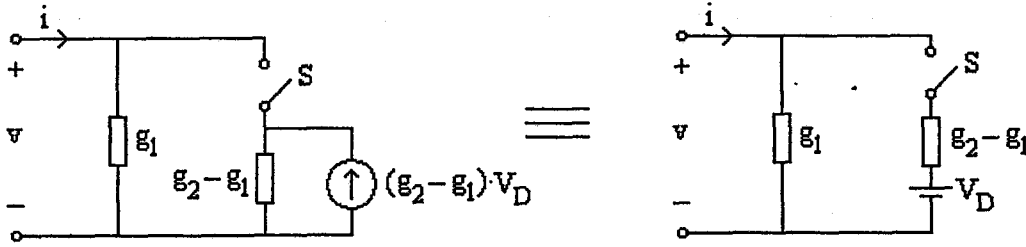
1. durum için:

$$[-1] \cdot [v] \geq [-V_D] \quad (3.12c)$$

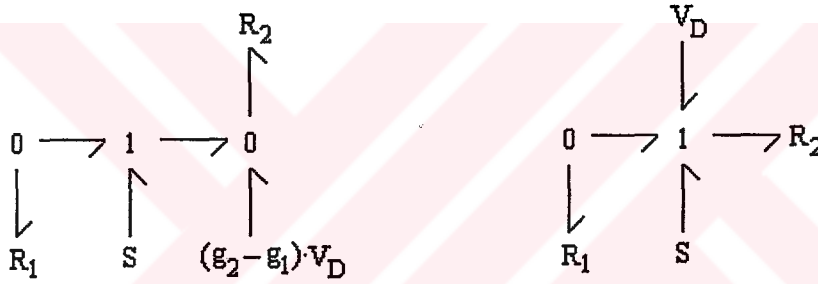
2. durum için:

$$[1] \cdot [v] \geq [V_D] \quad (3.12d)$$

$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = [0 \quad 0]$$



Şekil 3.11. Şekil 3.9b'deki karakteristiğe ilişkin iki farklı eşdeğer devre



Şekil 3.12. Şekil 3.11'deki eşdeğer devrelerin bağlaç diyagramı modelleri

Zener Diyot: Zener diyotun devre sembolü ve karakteristiği Şekil 3.13'de verilmiştir.

Buna göre zener diyotun uç denklemleri:

1. durum için:

$$i = g_1 \cdot v + (g_1 - g_2) \cdot V_z \quad (3.13a)$$

2. durum için:

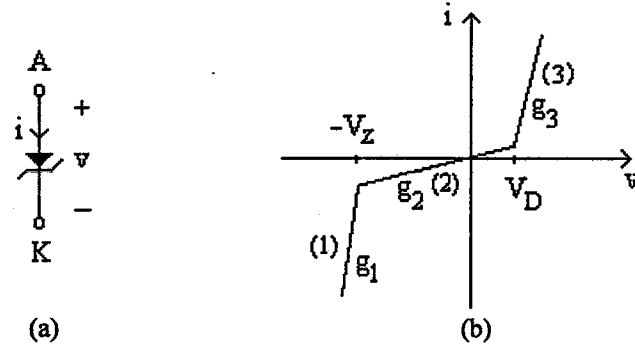
$$i = g_2 \cdot v \quad (3.13b)$$

3. durum için:

$$i = g_3 \cdot v + (g_3 - g_2) \cdot V_D \quad (3.13c)$$

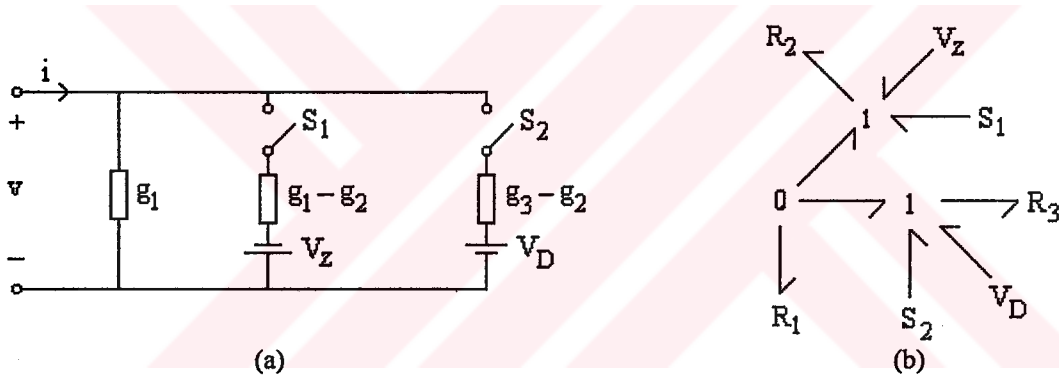
şeklinde yazılır. EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 3.13. Zener diyotun (a) gösterimi ve (b) akım-gerilim karakteristiği

Şekil 3.13b'deki karakteristiği temsil eden eşdeğer devre ve $R_1 = 1/(g_1 - g_2)$, $R_2 = 1/(g_3 - g_2)$ olmak üzere devrenin bağlaç diyagramı modeli Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Şekil 3.13b'deki karakteristiği temsil eden (a) eşdeğer devre ile (b) bağlaç diyagramı modeli

Kontrol eşitsizlikleri:

1. durum için:

$$[-1] \cdot [v] \geq [-V_z] \quad (3.13d)$$

2. durum için:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [v] \geq \begin{bmatrix} -V_z \\ -V_D \end{bmatrix} \quad (3.13e)$$

3. durum için:

$$[1] \cdot [v] \geq [V_D] \quad (3.13f)$$

$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = [0 \quad 0 \quad 0]$$

Tristör: Tristörün devre sembolü ve karakteristiği Şekil 3.15'de verilmiştir. Şekil 3.15b'deki karakteristiğe göre tristörün uç denklemleri:

1. durum için:

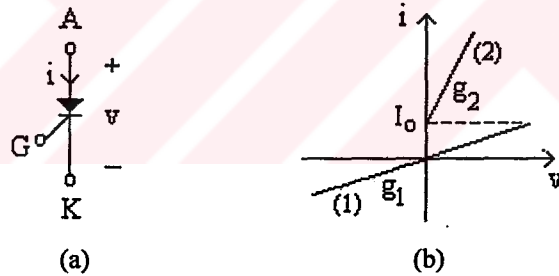
$$i = g_1 \cdot v \quad (3.14a)$$

2. durum için:

$$i = g_2 \cdot v + I_o \quad (3.14b)$$

olur ve eşdeğer devre ile birlikte $R_1 = 1/g_1$, $R_2 = 1/(g_2 - g_1)$ olmak üzere bağlaç diyagramı modeli Şekil 3.16'daki gibi elde edilir. EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 3.15. (a) Tristörün gösterimi (b) i-v karakteristiği

Kontrol eşitsizlikleri:

1. durum için:

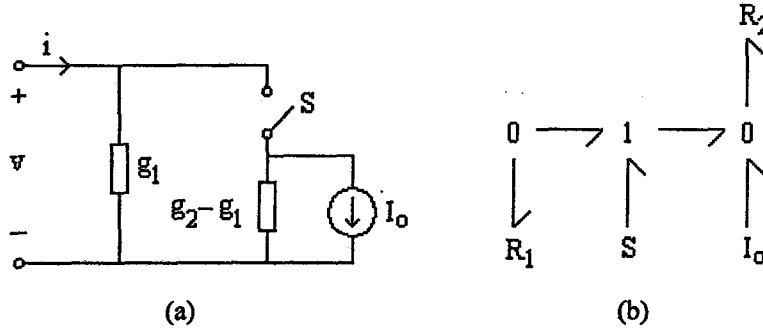
$$[-1] \cdot [i] \geq [-I_o] \quad (3.14c)$$

2. durum için:

$$[1] \cdot [i] \geq [I_o] \quad (3.14d)$$

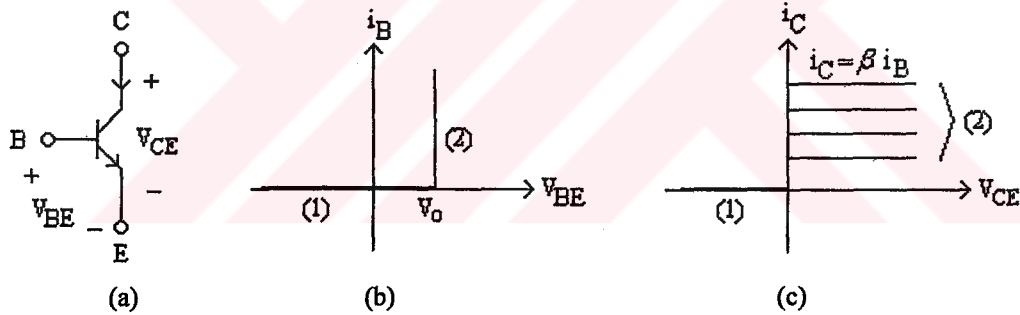
$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = [0 \quad n], \quad T^i = [n - \text{tane zaman değeri}]$$

Burada 2. elemanın durumu bir peryotta n-tane zamanla ilgilidir ve bu zaman değerleri de T^i vektörü ile verilmektedir.



Şekil 3.16. Şekil 3.15b'deki karakteristiğe ilişkin (a) eşdeğer devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli

Transistör: NPN tipi bir transistorün devre sembolü Şekil 3.17a'da verilmiştir. Parça-parça lineerleştirilmiş baz ve kolektör karakteristikleri ise Şekil 3.17b ve 3.17c'de görülmektedir [14].



Şekil 3.17. (a) Transistör (b) baz karakteristiği (c) kolektör karakteristiği

Uç denklemleri:

1. durum için:

$$i_B = 0, \quad i_C = 0 \quad (3.15a)$$

2. durum için:

$$V_{BE} = V_o, \quad i_C = \beta \cdot i_B \quad (3.15b)$$

şeklinde yazılır ve eşdeğer devre ile bağlaç diyagramı modeli Şekil 3.18'deki gibi elde edilir.

EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Kontrol eşitsizlikleri:

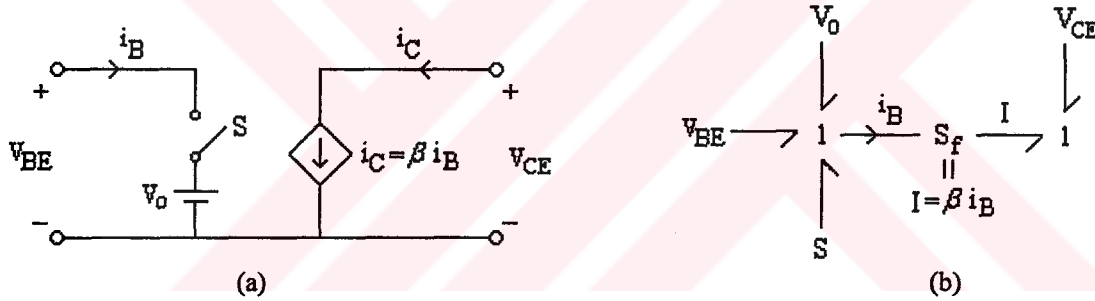
1. durum için:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{BE} \\ i_B \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} -V_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15c)$$

2. durum için:

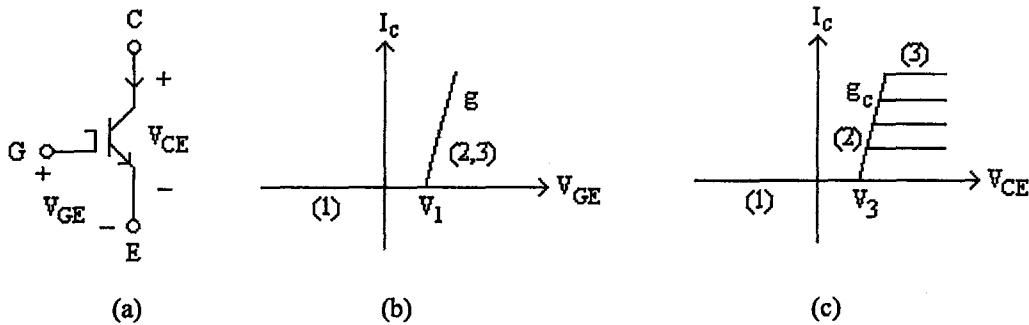
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{BE} \\ i_B \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} V_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15d)$$

$$Z^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Şekil 3.18. (a) Şekil 3.17b ve 3.17c'deki karakteristikleri temsil eden eşdeğer devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli

IGBT: IGBT nin devre sembolü Şekil 3.19a'da görülmektedir. Parça-parça lineerleştirilmiş i_C - V_{GE} ve i_C - V_{CE} karakteristikleri Şekil 3.19b ve 3.19c'de verilmiştir.



Şekil 3.19. (a) IGBT (b) I_C - V_{GE} karakteristiği (c) I_C - V_{CE} karakteristiği

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
EĞİTİM ARAŞTIRMA MERKEZİ

EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Kontrol eşitsizlikleri:

1. durum için:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{GE} \\ i_{CE} \end{bmatrix} \geq [-V_1] \quad (3.16a)$$

2. durum için:

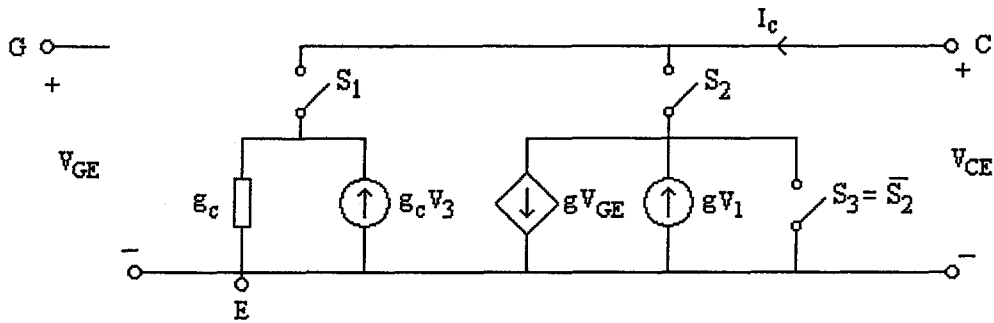
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{GE} \\ i_{CE} \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} V_1 \\ \beta \cdot V_1 \end{bmatrix} \quad (3.16b)$$

3. durum için:

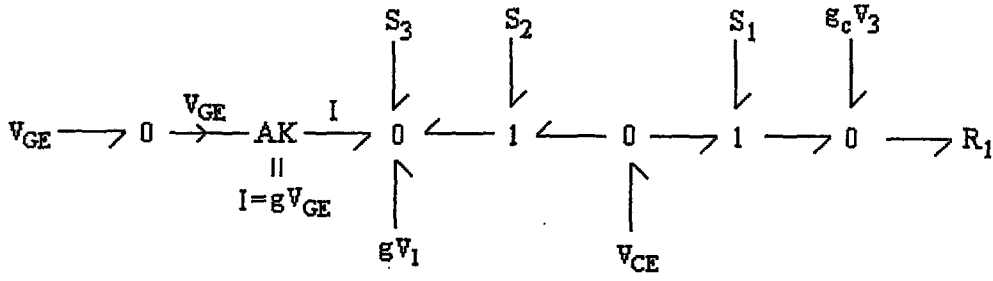
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\beta & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{GE} \\ i_{CE} \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} V_1 \\ -\beta \cdot V_1 \end{bmatrix} \quad (3.16c)$$

$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = [0 \quad 0 \quad 0]$$

Şekil 3.19b ve 3.19c'deki karakteristiklere ilişkin eşdeğer devre Şekil 3.20'de ve $R_1 = 1/g_c$ olmak üzere bu eşdeğer devreye ilişkin bağlaç diyagramı modeli de Şekil 3.21'de verilmiştir.



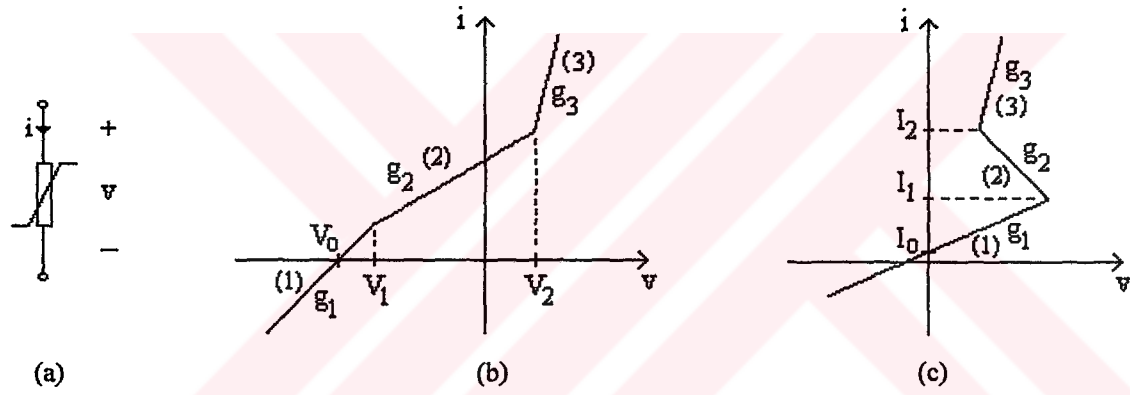
Şekil 3.20. Şekil3.20b ve 3.20c'deki karakteristiklere ilişkin eşdeğer devre



Şekil 3.21. Şekil 3.20'deki eşdeğer devrenin bağlaç diyagramı modeli

3.5.2. Lineer Olmayan Dirençler

Lineer olmayan dirençler akım ve gerilim kontrollü olarak iki genel başlıkta incelenebilir. Şekil 3.22'de lineer olmayan direncin gösterimi ile 3 durumlu parça-parça lineerleştirilmiş gerilim ve akım kontrollü karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 3.22. (a) Lineer olmayan direnç (b) Gerilim kontrollü ve (c) Akım kontrollü i-v karakteristikleri

Gerilim Kontrollü Direnç : Uç denklemleri:

1. durum için:

$$i = g_1 \cdot (v - V_0) \quad (3.17a)$$

2. durum için:

$$i = g_2 \cdot v + g_1 \cdot (V_1 - V_0) - g_2 \cdot V_1 \quad (3.17b)$$

3. durum için:

$$i = g_3 \cdot v + g_1 \cdot (V_1 - V_0) + g_2 \cdot (V_2 - V_1) - g_3 \cdot V_2 \quad (3.17c)$$

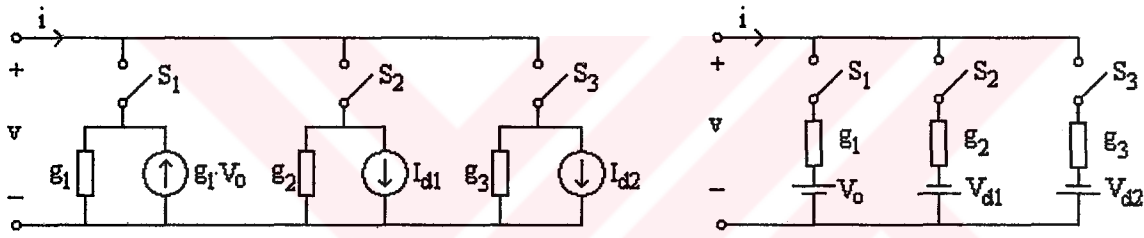
Eşdeğer devresi Şekil 3.23'deki gibi olup, burada kullanılan bazı değişkenlerin tam ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$I_{d1} = g_1 \cdot (V_o - V_1) + g_2 \cdot V_1, I_{d2} = g_1 \cdot (V_o - V_1) + g_2 \cdot (V_1 - V_2) + g_3 \cdot V_2 \quad (3.17d)$$

$$V_{d1} = \frac{g_1}{g_2} \cdot (V_o - V_1) + V_1, V_{d2} = \frac{g_1}{g_3} \cdot (V_o - V_1) + V_1 + \frac{g_2}{g_3} \cdot (V_1 - V_2) + g_3 \cdot V_2 \quad (3.17e)$$

EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 3.23. Şekil 3.22b'deki karakteristiğe ilişkin eşdeğer devreler

Kontrol eşitsizlikleri:

1. durum için:

$$[-1] \cdot [v] \geq [-V_1] \quad (3.17f)$$

2. durum için:

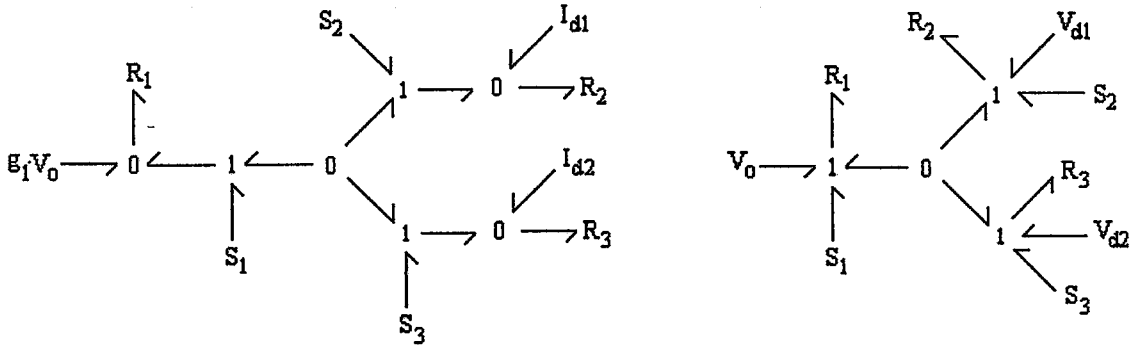
$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [v] \geq \begin{bmatrix} V_1 \\ -V_2 \end{bmatrix} \quad (3.17g)$$

3. durum için:

$$[1] \cdot [v] \geq [V_2] \quad (3.17h)$$

$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Şekil 3.24'de ise $R_1 = 1/g_1$, $R_2 = 1/g_2$, $R_3 = 1/g_3$ olmak üzere Şekil 3.23'deki eşdeğer devrelerin bağlaç diyagramı modelleri verilmiştir.



Şekil 3.24. Şekil 3.23'deki eşdeğer devrelerin bağlaç diyagramı modelleri

Akım Kontrollü Direnç: Uç denklemleri:

1. durum için:

$$i = g_1 \cdot v + I_o \quad (3.18a)$$

2. durum için:

$$i = g_2 \cdot v + \frac{g_2}{g_1} \cdot (I_o - I_1) + I_1 \quad (3.18b)$$

3. durum için:

$$i = g_3 \cdot v + \frac{g_3}{g_1} \cdot (I_o - I_1) + \frac{g_3}{g_1} \cdot (I_o - I_1) + \frac{g_3}{g_2} \cdot (I_1 - I_2) + I_2 \quad (3.18c)$$

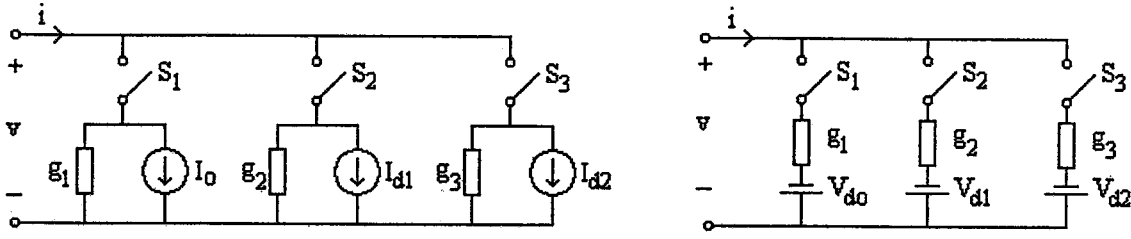
Eşdeğer devre Şekil 3.25'deki gibi elde edilir. Bu devrelerde kullanılan bazı değişkenlerin tam ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$I_{d1} = I_1 + \frac{g_2}{g_1} \cdot (I_o - I_1), \quad I_{d2} = \frac{g_3}{g_1} \cdot (I_o - I_1) + \frac{g_3}{g_2} \cdot (I_1 - I_2) + I_2 \quad (3.18d)$$

$$V_{d0} = \frac{I_0}{g_1}, V_{d1} = \frac{I_1}{g_2} + \frac{(I_0 - I_1)}{g_1}, V_{d2} = \frac{I_0 - I_1}{g_1} + \frac{I_1 - I_2}{g_2} + \frac{I_2}{g_3} \quad (3.18e)$$

EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 3.25. Şekil 3.23c'deki karakteristiğe ilişkin eşdeğer devreler

Kontrol eşitsizlikleri:

1. durum için:

$$[-1] \cdot [i] \geq [-I_1] \quad (3.18f)$$

2. durum için:

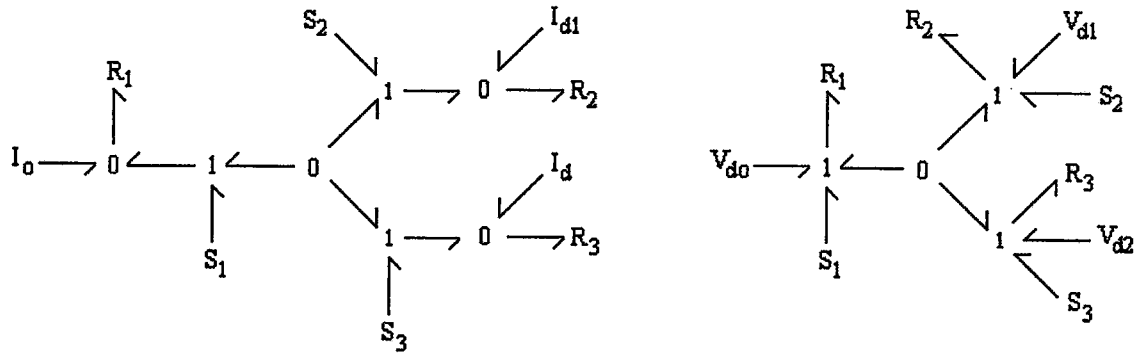
$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [i] \geq \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (3.18g)$$

3. durum için:

$$[1] \cdot [i] \geq [I_2] \quad (3.18h)$$

$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = [0 \quad 0 \quad 0]$$

Şekil 3.26'da ise $R_1 = 1/g_1$, $R_2 = 1/g_2$, $R_3 = 1/g_3$ olmak üzere Şekil 3.25'deki eşdeğer devrelerin bağlaç diyagramı modelleri verilmiştir.



Şekil 3.26. Şekil 3.25'deki eşdeğer devrelerin bağlaç diyagramı modelleri

3.5.3. Lineer Olmayan Kapasitörler

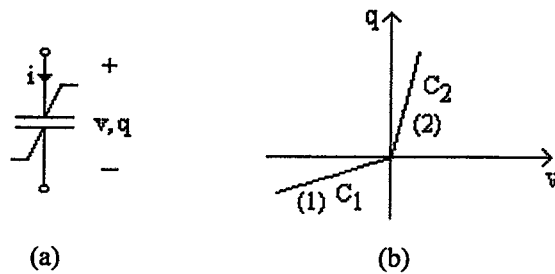
Şekil 3.27'de 2 uçlu lineer olmayan bir kapasitörün devre sembolü ve parça-parça lineerleştirilmiş iki durumlu bir kapasitörün q-v karakteristiği görülmektedir [14]. Uç denklemleri:

1. durum için:

$$q = C_1 \cdot v, \quad i = C_1 \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3.19a)$$

2. durum için:

$$q = C_2 \cdot v, \quad i = C_2 \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3.19b)$$



Şekil 3.27. (a) Lineer olmayan kapasitör ve (b) iki durumlu q-v karakteristiği

Eşdeğer devre ve $C_e = C_1 - C_2$ olmak üzere bağlaç diyagramı modeli Şekil 3.28'deki gibi elde edilir. EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Kontrol eşitsizlikleri:

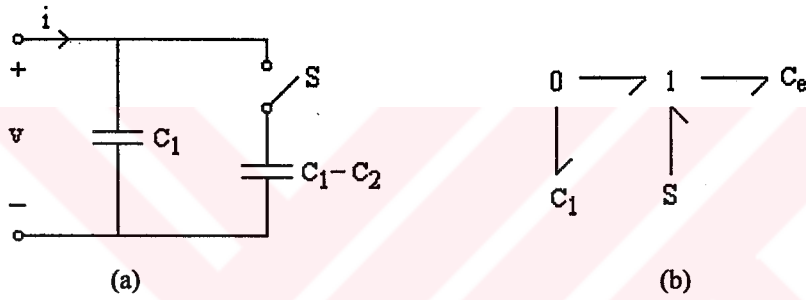
1. durum için:

$$[-1] \cdot [v] \geq [0] \quad (3.19c)$$

2. durum için:

$$[1] \cdot [v] \geq [0] \quad (3.19d)$$

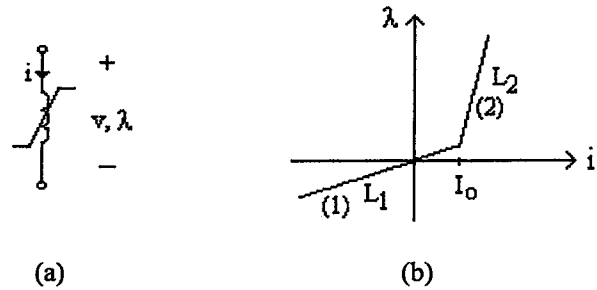
$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Şekil 3.28. (a) Şekil 3.27b'deki karakteristiği temsil eden eşdeğer devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli

3.5.4. Lineer Olmayan İndüktans

İki uçlu lineer olmayan bir indüktansın devre sembolü ve parça-parça lineerleştirilmiş λ -i karakteristiği (λ : halkalama akısı) Şekil 3.29'da görülmektedir [14].



Şekil 3.29. (a) Lineer olmayan indüktans (b) iki durumlu λ -i karakteristiği

Uç denklemleri:

1. durum için:

$$\lambda = L_1 \cdot i, \quad v = L_1 \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.20a)$$

2. durum için:

$$\lambda = L_2 \cdot i - (L_2 - L_1) \cdot I_o, \quad v = L_2 \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.20b)$$

Eşdeğer devre ve $L_e = L_2 - L_1$ olmak üzere bağlaç diyagramı modeli Şekil 3.30'daki gibi elde edilir. EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Kontrol eşitsizlikleri:

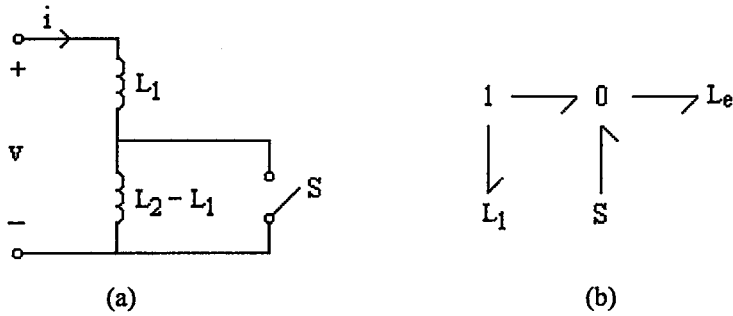
1. durum için:

$$[-1] \cdot [i] \geq [-I_o] \quad (3.20c)$$

2. durum için:

$$[1] \cdot [i] \geq [I_o] \quad (3.20d)$$

$$Z^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F^i = [0 \quad 0]$$



Şekil 3.30. (a) Şekil 3.29b'deki karakteristiği temsil eden eşdeğer devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli

4. BAĞLAÇ DİYAGRAMI MODELİ KULLANARAK LİNEER OLMAYAN SİSTEMLERİN FORMÜLASYONU VE ÇÖZÜMÜ

4.1. Giriş

Lineer olmayan elemanların durumları eşdeğer devrelerindeki anahtarların farklı pozisyonlarına göre EDAP matrisi ile tanımlanmıştır. Bu bölümde sistem bazında önce Sistem Durum-Eleman Durumu (SDED) ve Sistem Durumu-Anahtar Pozisyonu (SDAP) Matrisleri tanımlanacaktır. Ayrıca sistemde bazı eleman durumlarının aynı anda oluşması yada oluşmaması zorunlu olabilir. Yada bilinen bir sistem ise oluşabilecek sistem durumları tahmin edilebilir. Bu gibi durumlar için kullanılan Kısıtlama Matrisi de anlatılacaktır. Sonra durum, çıkış ve anahtarlama denklemleri elde edilecektir. Kontrol eşitsizlikleri sistem bazında birleştirilecektir. Modelleme ve formülasyon aşamalarından sonra çözüm, kararlılık, gözlenebilirlik, kontrol edilebilirlik, bode diyagramı ve yapay zeka gibi aşamalar gerçekleştirilebilir. Bu tezin esasını modelleme ve formülasyon aşamalarını gerçekleştiren programın algoritması ve gerçekleştirilmesi oluşturur. Programın bir bütünlük oluşturması için geçici ve sürekli hal davranışının elde edildiği çözüm kısmı da eklenmiştir.

4.2. Sistem Durumu-Eleman Durumu (SDED)

Bir sistemde, eleman durumlarının birbirlerine göre farklı kombinasyonlarından sistem durumları oluşur. Sistem durumlarına göre eleman durumlarını gösteren matrise Sistem Durumu-Eleman Durumu (SDED) Matrisi denir. Lineer olmayan i. elemanın lineer bölgelerinin sayısı n_{ed}^i , bir sistemdeki sistem durumu sayısı n_{sd} ise;

$$n_{sd} = \prod_{i=1}^{n_{es}} n_{ed}^i \quad (4.1)$$

dir. M_{SDED} , $n_{sd} \cdot n_{es}$ boyutlu SDED Matrisi olsun, bu matriste 1. sütun vektörü 1. elemana, 2. sütun vektörü 2. elemana, n_{es} . sütun vektörü de n_{es} . elemana ilişkindir. Sütun vektörlerinin her biri M_{EDAP} daki elemanlara ilişkin eleman durumlarından ve bu durumların birbirlerine göre kombinasyonlarından oluşur. Burada her satır bir sistem durumunu oluşturan eleman durumlarını gösterir. Buna göre;

$$M_{SDED} = \left[(m_{SDED})_{j,i} \right]_{n_{sd} \cdot n_{es}}, (m_{SDED})_{j,i} \in \mathbb{N} \quad (4.2)$$

dir ve $(m_{SDED})_{j,i}$, j. sistem durumunda, i. elemanın durumunu gösterir.

Çoğu zaman değişik elemanlar birbirleri ile sistemi oluşturacak şekilde bağlandığında, örneğin; i. elemanın j. durumuna ve k. elemanın l. durumuna aynı anda giremeyeceği aşkar olabilir. Veyahut bu elemanlar belirtilen durumlara aynı anda beraber girip çıkmak zorunda olabilirler. Bu durumda sistem durumunu azaltarak gereksiz hesaplamaların önlenmesi ve/veya mümkün olmayacak sistem durumlarına engel olunması açısından önem kazanır. Bunun için bu durumlar oluşabilecek sistem durumları içerisinde yer almamalıdır, bu Kısıtlama Matrisi ile sağlanır. Lineer olmayan elemanların sistem durumları arasında n_k kısıtlama mevcutsa Kısıtlama Matrisi,

$$M_{KT} = \left[(m_{KT})_{k,j} \right]_{n_k \cdot (n_{es}+1)}, (m_{KT})_{k,j} \in \mathbb{N} \quad (4.3)$$

şeklinde tanımlanır. Bu matriste 1. sütun vektörünün elemanları aşağıdaki gibi tarif edilirler.

$$(m_{KT})_{k,1} = \begin{cases} 0, & k. \text{ satırda belirtilen durumlar aynı anda mümkün olamaz ise} \\ 1, & k. \text{ satırda belirtilen durumlar aynı anda oluşmak zorunda ise} \end{cases}$$

2. ve diğer sütun vektörlerinin elemanları da aşağıdaki gibi tarif edilirler.

$$(m_{KT})_{k,t} = \begin{cases} 0, & (t-1). \text{ eleman ile ilgili kısıtlama yoksa} \\ n, & (t-1). \text{ elemanın n. eleman durumu kısıtlamaya tabi ise} \end{cases}$$

Burada $t=2,3,\dots,n_{es}+1$ olup eleman sayısının bir fazlasını gösterir. Bir kısıtlama birden çok sistem durumunu elimine edebilir. Bu yüzden kısıtlanan sistem durumu sayısı $n_{ks} \geq n_k$ dir. Bu kısıtlamalar ile daha önce tanımlanan SDED Matrisinin satır sayısı azalır ve

$$n_{sd} \leq \prod_{i=1}^{n_{es}} n_{ed}^i - n_{ks} \quad (4.4)$$

olur.

4.3. Sistem Durumu-Anahtar Pozisyonu (SDAP)

Bir sistemde; sistem durumu, eleman durumlarının birbirine göre farklı kombinasyonlarından, eleman durumları da anahtar pozisyonlarının birbirlerine göre farklı kombinasyonlarından oluşur. Bu durumda sistem durumları, anahtar pozisyonlarının birbirine göre farklı kombinasyonlarından meydana gelir. Sistem durumlarına göre anahtar pozisyonlarını gösteren matrise Sistem Durumu-Anahtar Pozisyonu (SDAP) Matrisi adı verilir.

Bir sistemdeki toplam anahtar sayısı n_s ise

$$n_s = \sum_{i=1}^{n_{es}} n_s^i \quad (4.5)$$

dir. M_{SDAP} , $n_{sd} \cdot n_s$ boyutlu SDAP Matrisi olmak üzere, bu matriste her sütun vektörü ait olduğu anahtarın n_{sd} tane sistem durumundaki pozisyonunu, her satır vektörü ise sistemdeki n_s tane anahtarın o sistem durumundaki pozisyonlarını gösterir. Buna göre

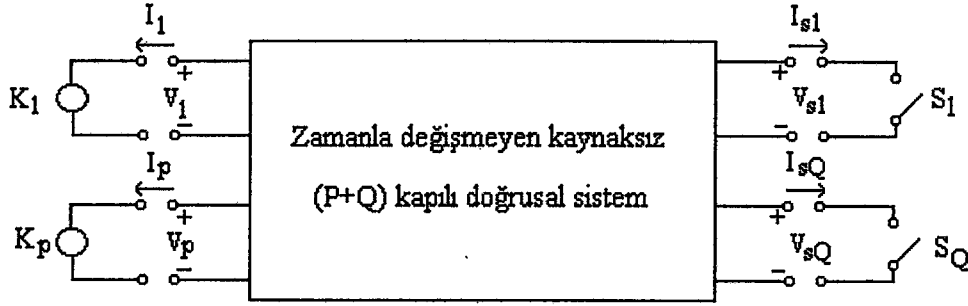
$$M_{SDAP} = \left[(m_{SDAP})_{j,p} \right]_{n_{sd} \cdot n_s}, (m_{SDAP})_{j,p} \in \{0,1\} \quad (4.6)$$

dir ve $(m_{SDAP})_{j,p}$; j. sistem durumunda, p. anahtarın pozisyonunu gösterir. Bu matris, M_{EDAP} ve M_{SEDE} kullanılarak program tarafından bulunur.

4.4. Durum ve Çıkış Denklemlerinin Elde Edilmesi

Bağlaç diyagramı modelinde bir ve iki kapılı elemanlara yönelmiş her bir bağlaç bir elemanı temsil etmektedir. Bu bölümde verilecek olan formülasyon için N_D düğüm sayısı ise bağlaç diyagramı modelindeki 0- ve 1-kapılarına bağlı elemanların sayılarından elde edilebilir.

P adet giriş kaynağı ve Q adet anahtar içeren bir sistemi ele alalım. Bu sistemde tüm kaynaklar ve anahtarlar sistem dışına alınarak, (P+Q)-kapılı kaynaksız lineer bir sistem elde edilebilir. Böylece, (P+Q)-kapılı kaynaksız lineer sistem, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi sistemin zamanla değişmeyen bölümünü oluşturur [20].



Şekil 4.1. (P+Q)-kapılı zamanla değişmeyen kaynaksız lineer sistem

Bağlaç diyagramında eleman sayısı N , düğüm sayısı N_D olmak üzere, kolon sayısı N ve satır sayısı (N_D-1) olan düğümler (incidence) matrisi;

$$PI = \left[\begin{pmatrix} p_i \end{pmatrix}_{i,j} \right]_{N \times (N_D-1)} \quad (4.7)$$

şeklinde dir. Düğümler matrisini bağlaç diyagramı modelinden elde edebilmek için;

$$(p_i)_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{j. eleman i. 0 - kapısına bağlı ve seçilmiş enerji akış yönü i. 0 - kapısından gidiyorsa} \\ -1 & \text{j. eleman i. 0 - kapısına bağlı ve seçilmiş enerji akış yönü i. 0 kapısına geliyorsa} \\ 0 & \text{j. eleman i. 0 - kapısına bağlı değilse} \end{cases}$$

şeklinde bir tanımlama yapılmıştır. N ve N_D değerleri bağlaç diyagramı modelinden faydalanılarak program tarafından hesaplanmaktadır.

PI 'nın lineer bağımsız kolonları önde toplandığında bu matris, $PI=[A1 : A2]$ şeklinde bölünür; $A1$ seçilmiş lineer bağımsız kolonları, $A2$ ise diğer kolonları gösterir. Sistem teorisinin 2. ve 3. postülatları (Kirchoff'un akım ve gerilim kanunları olarak da bilinirler) gereğince;

$$[A1 : A2] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = [0] \quad (4.8)$$

$$[I : A1^{-1} \cdot A2] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = [0] \quad (4.9)$$

$$[-(A1^{-1} \cdot A2)^T : I] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = [0] \quad (4.10)$$

denklemleri yazılabilir. Bu denklemlerde Ia (Ib) lineer bağımsız (diğer) kolonlara ilişkin bağlaçların akımlarını gösterir. Va (Vb) benzer şekilde tanımlanmıştır. $[-(A1^{-1} \cdot A2)^T : I]$ matrisi çevre matrisi olarak bilinir ve

$$HG = \left[\begin{pmatrix} hg \\ \end{pmatrix}_{i,j} \right]_{N \cdot (N-(ND-1))} \quad (4.11)$$

şeklinde gösterilebilir.

Devrede çözümü istenen çıkış büyüklükleri elemanın uç değişkenleri olabileceği gibi, bunların lineer bileşeni de olabilir. Ayrıca eleman durumlarının tespiti için kontrol eşitsizliklerinde kullanılmak üzere bir takım durum değişimine neden olan uç değişkenlerinin de çözümü gerekmektedir. Çözümü bulunması gereken büyüklükler bir y vektöründe toplanmaktadır.

Başlangıç denklemlerinin elde edilmesi için devredeki bütün anahtarlar ilk anda açık kabul edilerek akımı sıfır olan akım kaynakları gibi göz önüne alınmaktadır. Elemanların uç denklemlerinin ve elemanların birbirine bağlanması ile ortaya çıkan Kirchhoff'un akım ve gerilim denklemlerinin toplu halde yazılması ile başlangıç denklemleri daha basit halde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 & 0 \\ 0 & E_{32} & 0 & E_{24} \\ 0 & E_{32} & I & E_{34} \\ 0 & E_{42} & 0 & E_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{X} \\ y \\ Y \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \overline{A1} \\ C1 \\ \overline{C1} \end{bmatrix} \cdot [X] + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \overline{B1} & \overline{B1}^8 \\ D1 & D1^8 \\ \overline{D1} & \overline{D1}^8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ U_s \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Burada X vektörü, kapasitör gerilimleri ve indüktans akımlarının oluşturduğu durum değişkenleri vektörüdür. Y vektörü; kapasitör akımları (i_C), indüktans gerilimlerinin (v_L) ve bağımsız gerilim (akım) kaynağının akımı (gerilimi) ile cebirsel çok uçlu elemanların gerilimlerinden ve akımlarından oluşan vektördür. y vektörü çıkış değişkenlerini gösteren vektör olup, kontrol eşitsizliklerinde kullanılan ve durum değişimine neden olan uç büyüklüklerini de içerir. U vektörü bağımsız kaynakların belirtilmiş uç değişkenleridir. Devredeki bütün anahtarlar ilk anda açık kabul edildiği için U_s vektörü, her anahtarın akımını, U_{sc} vektörü de U_s vektörünün komplementeri olup her anahtarın gerilimini gösterir.

Durum, çıkış, anahtarlama ve kontrol eşitsizliklerinin hesaplamalarında bellek ve zaman tasarrufu için Y vektörünün ve çarpanlarının yok edilmesinde herhangi bir sakınca yoktur. Y

vektörünün ve çarpanlarının yok edilmesi için gerekli elementer satır işlemi sonucunda başlangıç denklemleri,

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{X} \\ y \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ C \\ \bar{C} \end{bmatrix} \cdot [X] + \begin{bmatrix} B & B^s \\ D & D^s \\ \bar{D} & \bar{D}^s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ U_s \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

şeklinde olur.

Bir sistemde, k. sistem durumu göz önüne alınarak U_k ve U_{kc} vektörleri tanımlanır. U_k vektörü, U_s vektörü ile aynı boyutta olup k. sistem durumundaki açık anahtarların akımlarını ve kapalı anahtarların gerilimlerini içeren vektördür. U_{kc} vektörü ise U_k vektörünün komplementeridir. Bu durumda $[U_k \ U_{kc}]^T$ ve $[U_s \ U_{sc}]^T$ vektörleri,

$$\begin{bmatrix} U_k \\ U_{kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_k & I - T_k \\ I - T_k & T_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_{sc} \end{bmatrix} \text{ veya } \begin{bmatrix} U_s \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_k & I - T_k \\ I - T_k & T_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_k \\ U_{kc} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

şeklindeki bir lineer idomptent dönüşümle birbirlerinden elde edilebilirler. Burada T_k , U_k , ve U_s vektörlerindeki farklı değişkenlere göre, sıfırdan farklı değerlerin sıfır yapılmasıyla Q'Q dereceli bir birim matristen elde edilir [57].

Denklem (4.14), (4.13)'deki başlangıç denklemlerinde kullanılırsa k. sistem durumu için başlangıç denklemleri ,

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & (P_{13} \cdot T_k - B^s \cdot (I - T_k)) \\ P_{21} & P_{22} & (P_{23} \cdot T_k - D^s \cdot (I - T_k)) \\ P_{31} & P_{32} & (P_{33} \cdot T_k - \bar{D}^s \cdot (I - T_k)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{X} \\ y \\ U_{kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ C \\ \bar{C} \end{bmatrix} \cdot [X] + \begin{bmatrix} B & (B^s \cdot T_k - P_{13} \cdot (I - T_k)) \\ D & (D^s \cdot T_k - P_{23} \cdot (I - T_k)) \\ \bar{D} & (\bar{D}^s \cdot T_k - P_{33} \cdot (I - T_k)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ U_k \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

olarak elde edilir. Bu denklemler [57]'de verilen başlangıç denklemlerinin özel bir hali olup (Y yok edildi) bunlardan hareketle durum ve çıkış denklemlerini bulmak için takip edilen yol anılan referanstakinin aynısı olup burada tekrar edilmeyecektir. Bu şekilde sistemin k. durumu için durum ve çıkış denklemleri topluca

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_k(t) \\ y_k(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_k \\ C_k \end{bmatrix} \cdot [X_k(t)] + \sum_{i=0}^{J_k} \begin{bmatrix} B_{k,i} \\ D_{k,i} \end{bmatrix} \cdot \frac{d^i}{dt} [U(t)] \quad (4.16)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $y_k(t)$, y_k nın k. sistem durumundaki değeridir. $U(t) = U \cdot e^{P \cdot t}$ eksponansiyel giriş için durum ve çıkış denklemleri

$$\dot{X}_k(t) = A_k \cdot X_k(t) + B_k \cdot U(t) \quad (4.17)$$

$$y_k(t) = C_k \cdot X_k(t) + D_k \cdot U(t) \quad (4.18)$$

olur. Burada

$$B_k = \sum_{i=0}^{J_k} P^i \cdot B_{k,i} \quad (4.19)$$

$$D_k = \sum_{i=0}^{J_k} P^i \cdot D_{k,i} \quad (4.20)$$

dir.

4. 5. Anahtarlama Denklemleri

Sistemin bulunduğu durum k ve sistemin geçeceği yeni durum j ise $\sigma_{k,j}$ anahtarlama anına ilişkin anahtarlama denklemleri de, bir önceki alt bölümde anılan referanstaki gibi bulunursa sonuç olarak

$$X_j(\sigma_{k,j}^+) = F_{k,j} \cdot X_k(\sigma_{k,j}^-) + \sum_{i=0}^{j_k+j_j-\delta(j_i)} G_{k,j,i} \cdot U^{(i)}(\sigma_{k,j}^-) + \sum_{i=0}^{j_j-1} G_{k,j,i} \cdot \left[U^{(i)} \cdot (\sigma_{k,j}^+) - U^{(i)} \cdot (\sigma_{k,j}^-) \right] \quad (4.21)$$

şeklinde elde edilir. Burada,

$$F_{k,j} = Q_{j,1} \cdot Q_{k,j}^T + Q_{j,1} \cdot Q_{k,2}^T \cdot \bar{C}_k + \sum_{\gamma=0}^{J_j-1} \bar{G}_{k,\gamma}^s \cdot \bar{T}_k \cdot \bar{C}_k \cdot A_k^\gamma \quad (4.22)$$

$$G_{k,j,i} = \begin{cases} Q_{j,1} \cdot Q_{k,2}^T \cdot \bar{D}_{k,i} + \sum_{\gamma=0}^{j_j-1} \bar{G}_{k,\gamma}^s \cdot \bar{T}_k \cdot U_{k,\gamma,i} & i = 0, 1, 2, \dots, j_k \\ \sum_{\gamma=i-j_k}^{j_j-1} \bar{G}_{k,\gamma}^s \cdot \bar{T}_k \cdot U_{k,\gamma,i} & i = j_k + 1, \dots, j_k + j_j - 1 \end{cases}$$

$$\bar{G}_{k,j,i} = \sum_{\gamma=i}^{j_j-1} A_j^{\gamma-i} \cdot B_{j,\gamma+1} \quad i = 0, 1, \dots, j_j - 1 \quad (4.23)$$

$$\bar{G}_{k,j,i}^s = \sum_{\gamma=i}^{j_j-1} A_j^{\gamma-i} \cdot B_{j,\gamma+1}^s \quad i = 0, 1, \dots, j_j - 1 \quad (4.24)$$

$$\bar{T}_k = 2 \cdot T_k \cdot T_j - T_k - T_j \quad (4.25)$$

$$\delta(j_j) = \begin{cases} 0, & j_j = 0 \text{ ise} \\ 1, & j_j \geq 1 \text{ ise} \end{cases}$$

dir. Denklem (4.17) ve (4.18)'deki durum ve çıkış denklemleri ile Denklem (4.21)'deki anahtarlama denklemleri $\sigma_{i,k} < t \leq \sigma_{k,j}$ için devrenin davranışını tanımlar, burada $\sigma_{i,k}$ k. sistem durumuna geçiş zamanını gösterir.

$U(t) = U \cdot e^{p \cdot t}$ eksponansiyel giriş için anahtarlama denklemleri $\sigma_{k,j}$ anında

$$X_j(\sigma_{k,j}^+) = F_{k,j} \cdot X_k(\sigma_{k,j}^-) + G_{k,j} \cdot u(\sigma_{k,j}) \quad (4.26)$$

dir. Burada,

$$G_{k,j} = \sum_{i=0}^{j_k+j_j-\delta(j_j)} p^i \cdot G_{k,i} \quad (4.27)$$

dir.

4.6. Kontrol Eşitsizlikleri

Lineer olmayan sistemlerin parça-parça lineer yapılarak periyodik anahtarlar içeren lineer devreler gibi formülasyonundaki en önemli farklılık anahtarlama zamanlarının önceden bilinmiyor olmasıdır. Dolayısıyla sadece durum, çıkış ve anahtarlama denklemleri formülasyon ve çözüm için yeterli değildir. Bunlara ilaveten kontrol eşitsizliklerinin kullanılması da gereklidir.

Sistemin hangi sistem durumunda olduğunun belirlenebilmesi, aynı zamanda eleman durumlarını belirlemek için de kullanılan kontrol eşitsizlikleri ile mümkündür. Bir sistemde bulunan bütün lineer olmayan elemanlara ilişkin toplam kontrol eşitsizlikleri sayısı

$$n_{kd} = \sum_{i=1}^{n_{es}} \sum_{j=1}^{n_d^i} n_j^i \quad (4.28)$$

ise sistemin bütün kontrol eşitsizlikleri topluca matris formunda,

$$L \cdot \bar{y}(t) \geq R \quad (4.29)$$

biçiminde yazılır. Buna göre,

$$L = \left[(1)_{k,l} \right]_{n_{kd} \cdot m_k}, \quad (1)_{k,l} \in \mathbb{R} \quad (4.30)$$

$$R = \left[(r)_k \right]_{n_{kd}}, \quad (r)_k \in \mathbb{R} \quad (4.31)$$

$$\bar{y}(t) = \left[(\bar{y})_k(t) \right]_{m_k}, \quad (\bar{y})_k(t) \in \mathbb{R} \quad (4.32)$$

dir. Burada $\bar{y}(t)$ vektörü, $y(t)$ vektöründe bulunan ve elemanları durum değişimine neden olan uç büyüklüklerini içerir, boyutu m_k dir.

Her eleman durumu için kontrol eşitsizliklerinin sayısının birden fazla olması halinde bunların birbirine VE ile mi yoksa VEYA ile mi bağlı olduğu Z^i matrisi ile gösteriliyordu. Bir sistemdeki elemanların durum sayılarının toplamı

$$n_{td} = \sum_{i=1}^{n_{es}} n_d^i \quad (4.33)$$

ise sistemdeki lineer olmayan elemanlara ilişkin Z^i matrisleri topluca alt alta

$$Z = \left[(Z)_{l,k} \right]_{n_{td} \times \max_{i,j} n_j^i}, \quad (Z)_{l,k} \in \mathbb{N} \quad (4.34)$$

biçiminde yazılır.

Eleman durumlarının zamanla ilgili olup olmadıklarını gösteren F^i ve zamanla ilgili eleman durumlarına ilişkin zaman değerlerinin depolandığı T^i matrisleri ise sırayla yan yana

$$F^i = \left[(f)_k \right]_{n_{td}}, \quad (f)_k \in \mathbb{N} \quad (4.35)$$

$$T = \left[(t)_k \right]_{n_{tt}}, \quad (t)_k \in \mathbb{R} \quad (4.36)$$

şeklinde yazılırlar. Burada

$$n_{tt} = \sum_{i=1}^{n_{td}} f_i \quad (4.37)$$

dir.

4.7. Geçici ve Sürekli Hal Davranışı

Parça-parça lineer veya dışardan kontrollü elemanlar içeren sistemlerin geçici ve sürekli hal davranışlarının belirlenebilmesi için hangi sistem durumuna ne zaman girileceğinin bilinmesi gerekmektedir. Sistem durumlarının tespit edilebilmesi de lineer olmayan elemanın anahtarlama anlarına bağlıdır. Lineer olmayan elemanların anahtarlama anlarını bulabilmek için bu elemanlara ait kontrol eşitsizliklerinin ve dışardan kontrollü ise kontrolün ne zaman yapıldığı bilgisinin kullanılması gerekmektedir. Eğer kontrol eşitsizliklerindeki elemanlara ait uç büyüklükleri çıkış değişkeni olarak alınır ve durum ve çıkış denklemleri çözülürse hangi sistem durumunda bulunduğu tespit edilebilir.

i. sistem durumunda uyarma fonksiyonlarının sayısı N_f olmak üzere $t_{j,i} \leq t < t_{i,k}$ aralığında $U_k(t) = U_k \cdot e^{p_k \cdot t}$ için Denklem (4.17)'nin çözümü;

$$X_i(t) = e^{A_i(t-t_{j,i})} \cdot X_i(t_{j,i}) + \sum_{k=1}^{N_f} \left[(A_i - p_k \cdot I)^{-1} \cdot e^{p_k \cdot t} - (A_k - p_k \cdot I)^{-1} \cdot e^{p_k \cdot t_{j,i}} \cdot e^{A_k \cdot (t-t_{j,i})} \right] \cdot B_{i,k} \cdot U_k \quad (4.38)$$

şeklindedir. Burada her kaynak fonksiyonu için ayrı bir frekans kabul edilmiştir. Bir kaynak fonksiyonu birden fazla frekans içeriyorsa, bu kaynak için süperpozisyon teoreminden faydalanarak, farklı frekanstaki kaynakların toplam cevabı kaynağın cevabını verecektir. Eğer sistemde sabit DC kaynak varsa bu kaynakları üstel olarak ifade edebilmek için kosinüs fonksiyonu ile değişen ve frekanslarının çok küçük değerler olduğu varsayılmıştır [23].

$$y_i(t) = C_i X_i(t) + \sum_{k=1}^{N_f} D_{i,k} \cdot U_k \cdot e^{p_k \cdot t} \quad (4.39)$$

Bu çözüm $t=0$ anında başlanarak yapılır. Başlangıçta sistemin hangi durumda olduğu belli olmadığından herhangi bir durumda olduğu kabul edilerek işleme başlanabilir. Programda standart olarak sistemin birinci durumda olduğu kabul edilmiştir. Çıkış büyüklükleri de durum değişkenleri ve kaynak/kaynakların o anki durumu belli olduğundan hesaplanabilir. Çıkış büyüklüklerinin o anki değeri bulunarak kontrol eşitsizlikleri ile gözden geçirme yapılır ve elemanların durumları dolayısıyla sistem durumu belirlenir. Bazı uygulamalarda eleman durumlarını ve dolayısıyla sistem durumlarını belirlemede kontrol eşitsizliklerinin yanı sıra Denklem (4.35) ve (4.36)'da verilen bilgilerin de kullanılması gerekir. Örneğin bir tristör için kontrol eşitsizlikleri ile iletim şartlarının gerçekleşmiş olduğu tespit edilse bile tetikleme yapılmamışsa tristör kesimde kalmaya devam edecektir. Bu nedenle daha önce anlatılan T ve F değişkenlerinin de bu aşamada kontrol eşitsizlikleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekir.

Bahsedilen işlemler gerçekleştirilerek sistem durumu bulunduğunda, sistem durumunda bir değişim yoksa zaman değeri h adımı kadar artırılarak işleme devam edilir. Durum değişimi varsa, sistemin yeni durumu belirlenir ve bir önceki adımda durum değişkenlerinin aldıkları değer yeni durum için de kullanılarak bu yeni durumdan itibaren çözüme h adımı artışıyla devam edilir. Bu çalışmada durum değişkenleri sürekli kabul edildiğinden anahtarlama denklemleri elde edilmiş olmasına rağmen çözüm kısmında kullanılmamıştır.

Sistem durumu değiştiğinde farklı bir lineer bölgeye geçilmiştir ve bu bölge için geçerli olan durum uzay modelinin çözümde kullanılması gerekmektedir. Programda mümkün

olabilecek bütün sistem durumlarına ait durum uzay gösterimleri bulunduğundan bu durum sorun teşkil etmemektedir. Burada her sistem durumu için farklı sayıda durum değişkeni olabilir. Programda her sistem durumunda hangi değişkenlerin durum değişkeni olarak kaldığı, hangilerinin kalmadığı bilgileri tutulmaktadır. Yalnız her durum için en az bir durum değişkeni olma zorunluluğu bulunduğundan, gerekiyorsa sistemin davranışını etkilemeyecek şekilde bir durum değişkeni (örneğin hayali bir kapasitör) eklemek yeterli olacaktır. Ayrıca çıkış değişkenleri içerisinde durum değişkeni olabilecek bütün değişkenler dahil edilmektedir. Böylece çıkış değişkenleri her zaman değeri için bulunduğundan durum değişkeni olmayan bir büyüklüğün değişimi de programda hesaplanmış ve saklanmış olmaktadır.

Sistem durumlarında değişim olduğu zaman değerleri anahtarlama anlarıdır. Bu zaman değerleri programda bir vektör değişkenine depolanır. Bunun yanı sıra girilen sistem durumları da sırayla başka bir vektör değişkeninde saklanır. Her peryot sonunda bir önceki peryotta girilen durumlarla kıyaslama yapılır. O peryot için girilen sistem durumları bir önceki peryotla aynı ise çözüme devam edilmesi halinde diğer peryotlar için de aynı sonuçlar alınacağından, sistemin kalıcı duruma ulaştığı düşünülerek çözüm işlemi sona erdirilir [23,56].

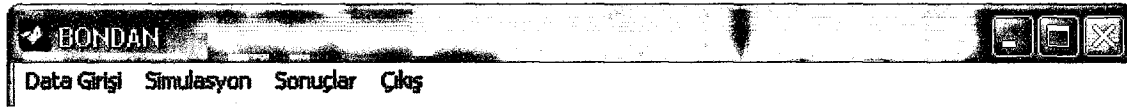
Bu tezde çözümü yapılacak devrelerdeki durum değişkenleri sürekli kabul edildiği için çözüm aşamasında anahtarlama denklemlerinin kullanılmasına gerek duyulmamıştır.

5. BONDAN PROGRAMI

Bu bölümde, daha önce anlatılan işlemleri gerçekleştirmek üzere hazırlanmış olan BONDAN programının özellikleri tanıtılacaktır. Program MATLAB [58] ortamında hazırlanmıştır ve grafiksel bir kullanıcı arabirimine sahiptir. Kullanıcı dataları bu grafiksel arabirim vasıtasıyla girildikten sonra simülasyon için ANALİZ ve çıkış verilerinin düzenlenip dosyaya yazılması için ise DOSYA adlı program çalıştırılmaktadır. ANALİZ programı altı ana altprogramdan oluşmaktadır. Bu altprogramlardan ilki olan HAZIRLA altprogramı, arabirim vasıtası ile girilen kullanıcı datalarının düzenlenmesi ve programda değerlendirilmeye hazır hale getirilmesini sağlar. İkinci altprogram, Bölüm 4’de anlatılan ve Denklem (4.15) ile verilen başlangıç denklemlerini elde eden BONDENK altprogramıdır. SDAP2 olarak adlandırılan altprogram ise Bölüm 4’de anlatılan SDED ve SDAP matrislerini tespit eden altprogramdır. FORM2 olarak isimlendirilen dördüncü altprogram, değişik bölgelerde durum ve çıkış denklemlerinin bulunmasını ve bölgeler arası geçişler için anahtarlama denklemlerinin hesaplanmasını gerçekleştirir. Beşinci altprogram olan COZUM altprogramı Bölüm 4’de anlatıldığı şekilde genel çözümün bulunmasını sağlar. DURUM adlı altıncı altprogram ise, çözüm aşamasında bulunulan sistem durumunu tespit eden altprogramdır.

5.1. Kullanıcı Arabirimi

Bu program data girişinin yapılabilmesi için grafiksel bir ortam hazırlar ve analiz sonucunda elde edilen verilerin çizdirilmesini, görüntülenmesini veya dosyaya yazdırılmasını sağlar. Data Girişi, Analiz, Sonuçlar ve Çıkış adlı dört menüden oluşmaktadır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. BONDAN Kullanıcı Arabirimi

Data girişi menüsünde Model Dataları Girişi, Çıkış Denklemleri Girişi, Kontrol Eşitsizlikleri Girişi, Kaynak Girişi, Eleman Durumları Girişi ve Simülasyon Dataları Girişi seçenekleri bulunmaktadır. Model Dataları Girişi seçeneği ile bağlaç diyagramı modeliyle ilgili olan kapılar, kapılara bağlı elemanların sayıları, türleri, değerleri gibi dataların kullanıcı tarafından girilebilmesi için bir pencere açılır. Kontrol Eşitsizlikleri Girişi seçeneğiyle de doğrusal olmayan elemanlara ait olan kontrol eşitsizliklerinin katsayıları ile bağlaçlar ve dışardan kontrollü elemanlara ait datalar girilir. Kaynak girişi işaretlendiğinde ise sistemdeki

kaynakların türleri (DC,AC), genlikleri, frekansları ve varsa faz açıları tanımlanır. Eleman Durumları Girişi ile sistemdeki EDAP matrisleri ve varsa kısıtlama bilgileri girilir. Simülasyon Dataları Girişi seçeneği, simülasyon zamanı ve başlangıç değerlerinin girildiği kısımdır. Data girişi tamamlandıktan sonra simülasyon ve sonuçların görüntülenmesi için diğer menülerdeki seçenekler kullanılır.

Diğer bir menü de Analiz menüsüdür ve bu menüde Analizi Başlat alt seçeneği bulunmaktadır. Bu süreç başlatılmadan önce kullanıcının model datalarını doğru bir şekilde girmiş olması gerekmektedir. Simülasyon süreci; dataları okuma, nedenselliklerin tayini, sistem durumlarının elde edilmesi, başlangıç denklemlerinin bulunması, her sistem durumu için durum uzay modelinin elde edilmesi, durum ve çıkış denklemlerinin çözümlerinin bulunması safhalarını içermektedir. Bağlaç diyagramı modelini kullanarak simülasyon gerçekleştiren diğer programlarla kıyaslandığında, geliştirilen programın avantajlarından biri durum değişkenlerinin kapasitör gerilimleri ve indüktans akımları olarak alınmasıdır. Günümüzdeki mevcut paket programlarda (TUTSIM, ENPORT v.b); kapasitördeki yük ve indüktanstaki akı durum değişkenleri olarak alınmaktadır. Elde edilen sonuçların görüntülenmesi ve istenildiğinde dosyaya yazdırılması için ise Sonuçlar menüsü kullanılır. Sonuçlar menüsünden seçilen tercihe göre DOSYA programı farklı işlevleri yapmak üzere çalışır. İsteğe göre; durum ve çıkış denklemlerinin katsayı matrisleri görülebilir, durum değişkenleri ve/veya çıkış değişkenlerinin zamana göre değişimi çizdirilebilir, anahtarlama anları görülebilir ve sonuçlar dosyaya yazılabilir. Bu işlemlerin hepsi DOSYA adlı programın çalışmasıyla gerçekleştirilir.

5.2. Data Girişi

Kullanıcı arabirimiyle dataların girilmesinden önce dataların hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Sistemin bağlaç diyagramı modeli Bölüm 3’de anlatıldığı gibi elemanların eşdeğer devreleri kullanılarak oluşturulur. Bu modelde standart bağlaç diyagramı elemanları ve kapıları ile birlikte anahtarlar da yer alabilir. Bu tezde, anahtarların farklı pozisyonlarına göre farklı modeller oluşturulmayıp sadece bir model için datalar girilmektedir. Modelde yer alan kapılar, elemanların türleri, değerleri, hangi kapılar arasında bağlı oldukları gibi bilgiler farklı vektörlere aktarılmaktadır. Sistem modelindeki bağlaç kapıları bağlantı sıralarına göre BKV vektöründe ve bu kapılara bağlı olan eleman sayıları ES vektöründe depolanırlar. Elemanların türleri, değerleri ve hangi kapılar arasında bağlı olduğu bilgileri ise modeldeki kapıların numaralandırılmasından sonra girilir.

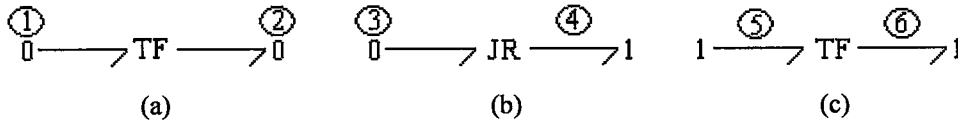
Numaralandırma işlemi BKV vektöründe girilen kapıların sırasına göre yapılmalıdır. Sistemdeki referans düğümün numarası sıfır kabul edilir. Sistemin bağlaç diyagramı modeli

sadece 0- ve 1-kapılarından oluşuyorsa sadece 0-kapıları numaralandırılır. Eğer modelde trafo ve/veya jirator varsa numaralandırma yapılırken aşağıdaki kurallara uyulmalıdır:

1) Transformatör ve/veya jirator'den çıkan bağlaçlar paralel çok kapılıya bağlı ise bağlaç diyagramı modelinde sadece paralel çok kapılıları numaralandırmak yeterlidir. (Şekil 5.2a)

2) Transformatör ve/veya jirator'den çıkan giriş veya çıkış bağlaçlarından bir veya ikisi seri çok kapılıya bağlı ise bu durumda seri çok kapılıya giden bağlaç da numaralandırılır. (Şekil 5.2b,c)

Sistemin bağlaç diyagramı modelinde sadece 1-kapısı bulunuyorsa, bu kapı numaralandırılmalıdır. Kapıların numaralandırma işlemi yapıldıktan sonra kapılara bağlı olan elemanların türleri ET, değerleri ED, modelde bulundukları yer ise BK1 ve BK2 vektörlerinde depolanır.



Şekil 5.2. (a), (b), (c) Bağlaç diyagramı modelinde transformatör ve jirator bulunduğunda numaralandırma tekniği

BONDAN programının kullanıcı arabirimi ile girilen dataların aktarıldığı değişkenlerin tanımları aşağıda yazılmıştır.

BKV: Bağlaç diyagramı modelindeki kapıların sıralı olarak girildiği vektördür. Transformatör ve jirator “2” ile simgelenir. 0-kapısı “0” ve 1-kapısı “1” olarak programa tanıtılır.

ES: BKV vektörü ile tanımlanan kapılara bağlı elemanların sayılarını gösteren vektördür.

ET: BK1 ve BK2 ile bağlandığı kapıların belirlendiği elemanların tiplerinin girildiği vektördür. Eleman türlerinin tanımı ise direnç ‘R’, kapasitör ‘C’, bobin ‘L’, jirator ‘JR’, gerilim kaynağı ‘GK’, akım kaynağı ‘AK’, gerilim kontrollü gerilim kaynağı ‘GKGK’, gerilim kontrollü akım kaynağı ‘GKAK’, akım kontrollü gerilim kaynağı ‘AKGK’, akım kontrollü akım kaynağı ‘AKAK’ olarak yapılmaktadır.

ED: ET vektörü ile girilen elemanların bu vektördeki sırayla değerlerinin depolandığı vektördür. Kaynaklara ilişkin datalar bu vektörde tanımlanmayacaktır.

BK1 (BK2): Bu değişken ET vektöründe girilen elemanları tanımlayan bağlacın, yönler dikkate alınmadan önceki (sonraki) bağlı bulunduğu numaraların depolandığı vektörü gösterir. Bu vektörler, eleman herhangi iki numara arasına direkt veya 1-kapısı üzerinden bağlı ise yukarıda anlatıldığı gibi oluşturulur. Eğer iki numara 0-kapısı üzerinden bağlı ise veya bu 0-kapısına bağlı komşu 1-kapısı üzerinden bağlı ise ve bu eleman diğer bir numaraya gitmiyorsa bu elemanın BK1 (BK2) vektöründeki numarası 0 alınır.

Yukarıda ismi geçen büyüklüklerin hepsi eksiksiz olarak girilmelidir. ET ile belirtilen eleman türlerinden gerilim ve akım kaynaklarının sayısı program tarafından bulunarak kaynakların özelliklerinin girilmesi istenir. Kaynaklara ilişkin girilecek bilgilerin aktarıldığı değişkenler aşağıda verilmiştir.

KG: Kaynakların genliğinin depolandığı vektördür.

KT: Kaynakların türünün depolandığı vektördür. DC kaynak 'DC', AC kaynak 'AC' olarak tanımlanmaktadır.

KFAZ: AC kaynakların faz açılarının depolandığı vektördür.

KFRK: AC kaynakların frekansının girildiği değişkendir. DC kaynaklar program tarafından çok düşük bir frekansa sahip bir kosinüs kaynak olarak tanımlanarak bu vektör tekrar düzenlenir.

Modelde istenen gerilim ve akım değişkeni çıkış olarak seçilebilir. Çıkış değişkenlerine ait tanımlamalar aşağıda verilmiştir.

CV: Seçilen çıkış değişkenlerinin isimlerini gösteren vektördür, bir başka deyişle y vektörüdür.

CBV: Çıkış değişkenlerinin tanımlanmasında kullanılan vektör.

CM: CV ve CBV arasındaki ilişkinin tanımlandığı matris.

CD: Bağımlı kaynaklara ilişkin değişkenlerin depolandığı vektör.

Lineer olmayan elemanlara ait olan değişkenler, kontrol eşitsizliklerine ait bilgiler ile diğer değişkenler aşağıda tanımlanmıştır.

NES: Sistemdeki lineer olmayan eleman sayısıdır. (n_{es})

NEDAP: EDAP matrislerinin sayısını gösteren değişkendir.

MEDAP: Lineer olmayan elemanlara ilişkin EDAP matrislerinin tanımlandığı matristir.

NK: Kısıtlama sayısı.

MK: Kısıtlama matrisi.

MKONTROL: Kontrol eşitsizliklerinde çıkış değişkenlerinin katsayı matrisi.

VKONTROL: Kontrol eşitsizliklerinde durum değişimine neden olan referans değerleri.

Z: Kontrol eşitsizliklerinin bağlaçları

F: Eleman durumlarının zamanla ilgili olup olmadıklarını gösteren vektör.

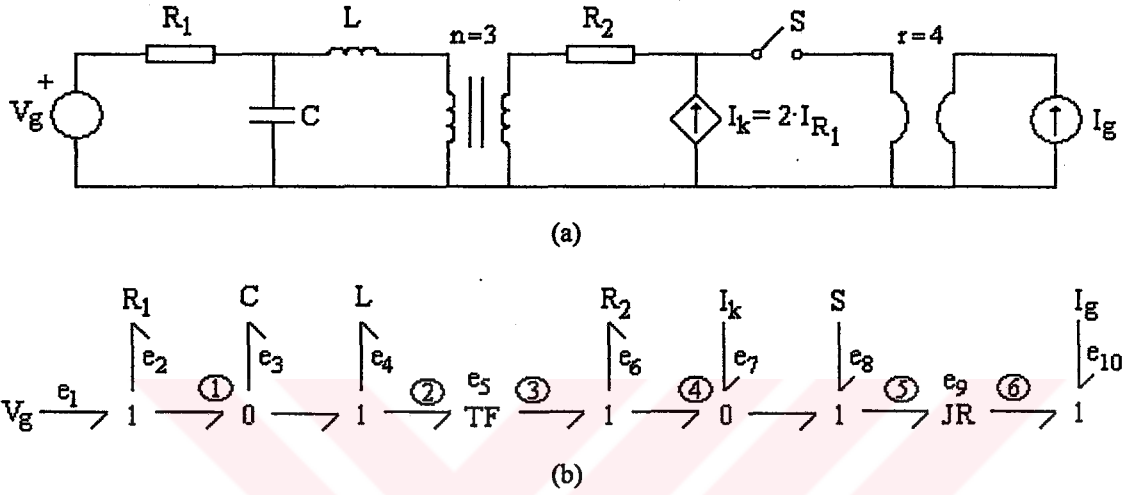
T: Zamanla ilgili olan eleman durumlarının zaman değerleri

BD: Durum değişkenlerine ait başlangıç değerlerinin depolandığı vektördür. Girilmediği zaman sıfır alınır.

TSON: Simülasyonun sona ereceği zaman değerini gösteren değişkendir.

ZGV: Anahtarlama anları belli olduğunda her sistem durumunda kalma süresinin depolandığı vektör.

Burada bağlaç diyagramı modeline ilişkin dataların yukarıda belirtilen dizilere yerleştirilme işleminin nasıl yapıldığı göstermek için Şekil 5.3a'daki devre örnek olarak alınmıştır. Şekil 5.3b'de devrenin bağlaç diyagramı modeli görülmektedir. Bu modelde önce 0-kapıları ile JR ve TF için özel numaralandırma işlemi yapılır ve referans düğümün numarası sıfır kabul edilir. Sistemde transformator ve/veya jirator olduğunda referans düğümü birleştirilerek model oluşturulmalıdır.



Şekil 5.3. (a) Data girişinin yapılışının gösterimi için örnek devre ve (b) numaralandırılmış bağlaç diyagramı modeli

Şekil 5.3b'deki modele göre bağlaç kapıları vektörü ve kapılardaki eleman sayıları aşağıdaki gibi olur.

$$BKV = [1, 0, 1, 2, 1, 0, 1, 2, 1]$$

$$ES = [2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$$

Direnç:

Modelde e_2 bağlacı ile gösterilen direnç elemanına ilişkin bilgiler aşağıdaki formda girilerek ilgili değişkenlere aktarılır.

<u>BK1</u>	<u>BK2</u>	<u>ED</u>	<u>ET</u>
(1)	(0)	5	'R'

Burada 5Ω luk direncin (1) ve (0) ile numaralandırılan kapılar arasına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

Kapasitör:

<u>BK1</u>	<u>BK2</u>	<u>ED</u>	<u>ET</u>
(1)	(0)	0.1	'C'

0.1 F'lık bir kondansatör (1) ve (0) numaralı kapıları arasına bağlıdır.

İndüktans:

<u>BK1</u>	<u>BK2</u>	<u>ED</u>	<u>ET</u>
(1)	(2)	1	'L'

1 H'lik bir indüktans (1) ve (2) numaralı kapıları arasına bağlıdır.

Bağımsız kaynaklar:

Şekil 5.3b'de e_1 ile gösterilen gerilim kaynağının $20 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \pi/3)$ V, e_{10} ile gösterilen akım kaynağının ise 3A lik DC kaynak olduğunu varsayarak ilgili datalar yazıldığında;

<u>BK1</u>	<u>BK2</u>	<u>ET</u>	<u>KT</u>	<u>KG</u>	<u>KFRK</u>	<u>KFAZ</u>
(0)	(1)	'GK'	'AC'	20	50	$\pi/3$
<u>BK1</u>	<u>BK2</u>	<u>ET</u>	<u>KT</u>	<u>KG</u>		
(0)	(6)	'AK'	'DC'	3		

şeklinde olur.

Jirator:

Şekil 5.3b'de e_9 ile gösterilen jiratorün bir ucu referans noktasına bağlı olduğundan sadece diğer uçlarına ait bilgiler girilir.

<u>BK1</u>	<u>BK2</u>	<u>ED</u>	<u>ET</u>
(5)	(6)	4	'JR'

Aktarım oranı 4 olan bir jirator (5) ve (6) nolu kapılar arasına bağlıdır.

Transformatör:

Jirator için söylenenler transformatör için de geçerlidir.

<u>BK1</u>	<u>BK2</u>	<u>ED</u>	<u>ET</u>
(2)	(3)	3	'TF'

Dönüştürme oranı 3 olan bir transformatör (2) ve (3) nolu kapılar arasına bağlıdır.

Anahtar:

İdeal bir anahtar, programda 'S' ile gösterilir. Anahtar, bağlaç modeli diyagramındaki diğer elemanlar gibi programa doğrudan tanımlanabilmektedir.

<u>BK1</u>	<u>BK2</u>	<u>ET</u>
(4)	(5)	'S'

Modeldeki tüm anahtarlar ilk anda açık kabul edilirler ve anahtarların diğer pozisyonlarına geçiş programda elde edilen SDAP matrisi ile gerçekleştirilir.

Bağımlı Kaynaklar:

Bağımlı kaynaklar tanımlanırken modeldeki herhangi bir bağlacın akım yada gerilim değişkeni kullanılabilir. Şekil 5.3'deki bağımlı kaynak akım kontrollü gerilim kaynağıdır ve $k=2$ dir. Bu elemana ilişkin bilgiler:

<u>BK1</u>	<u>BK2</u>	<u>ET</u>	<u>ED</u>	<u>CD</u>
(0)	(4)	'AKAK'	2	'E3'

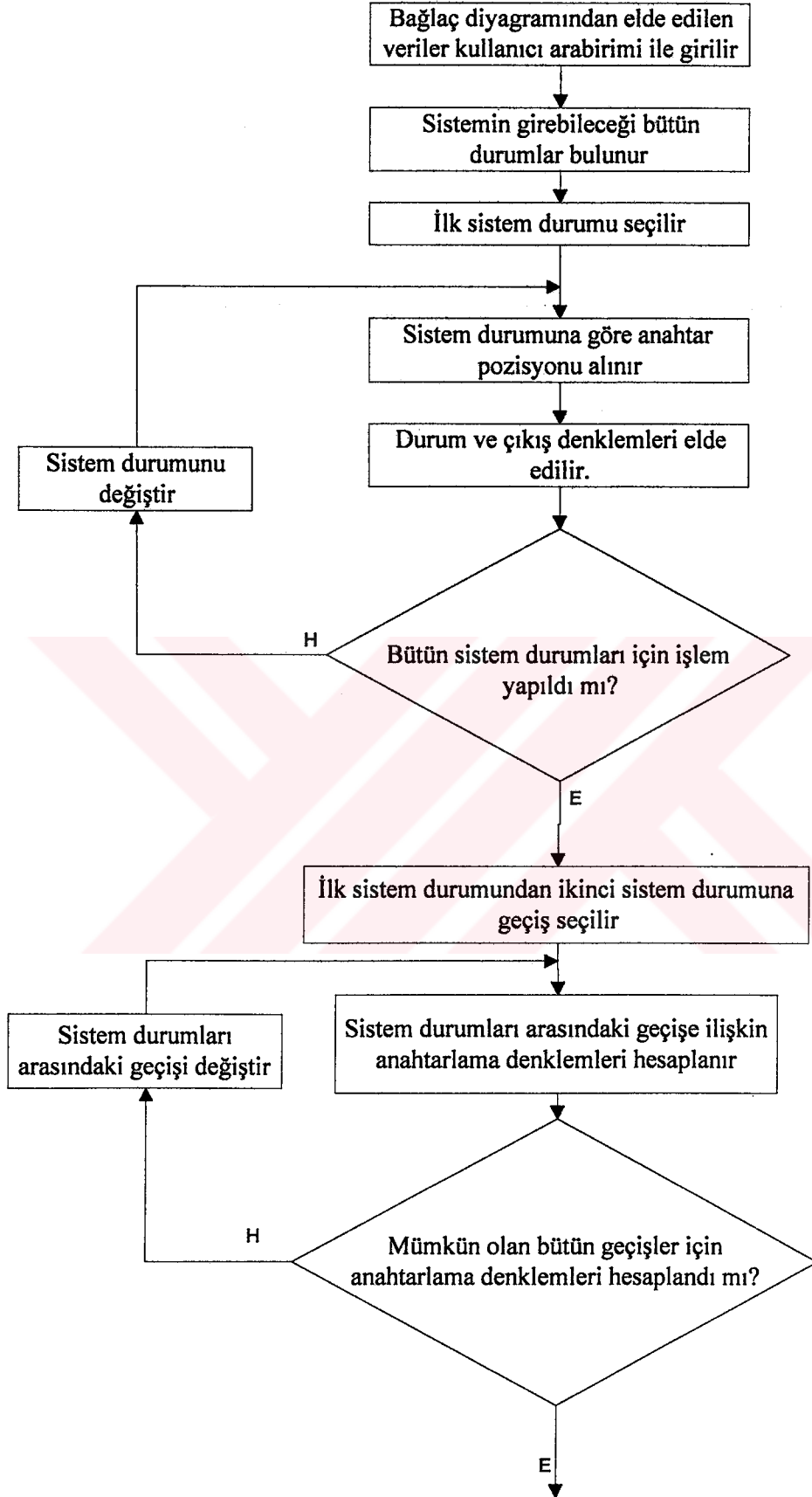
Elektriksel olarak tarif edilirse Akım Kontrollü Akım Kaynağı 2 nolu bağlacın akımına bağlı olan bir akım kaynağıdır ve $I = 2 \cdot I_3$ olur. Diğer bağımlı kaynaklar da benzer şekilde tanımlanabilir.

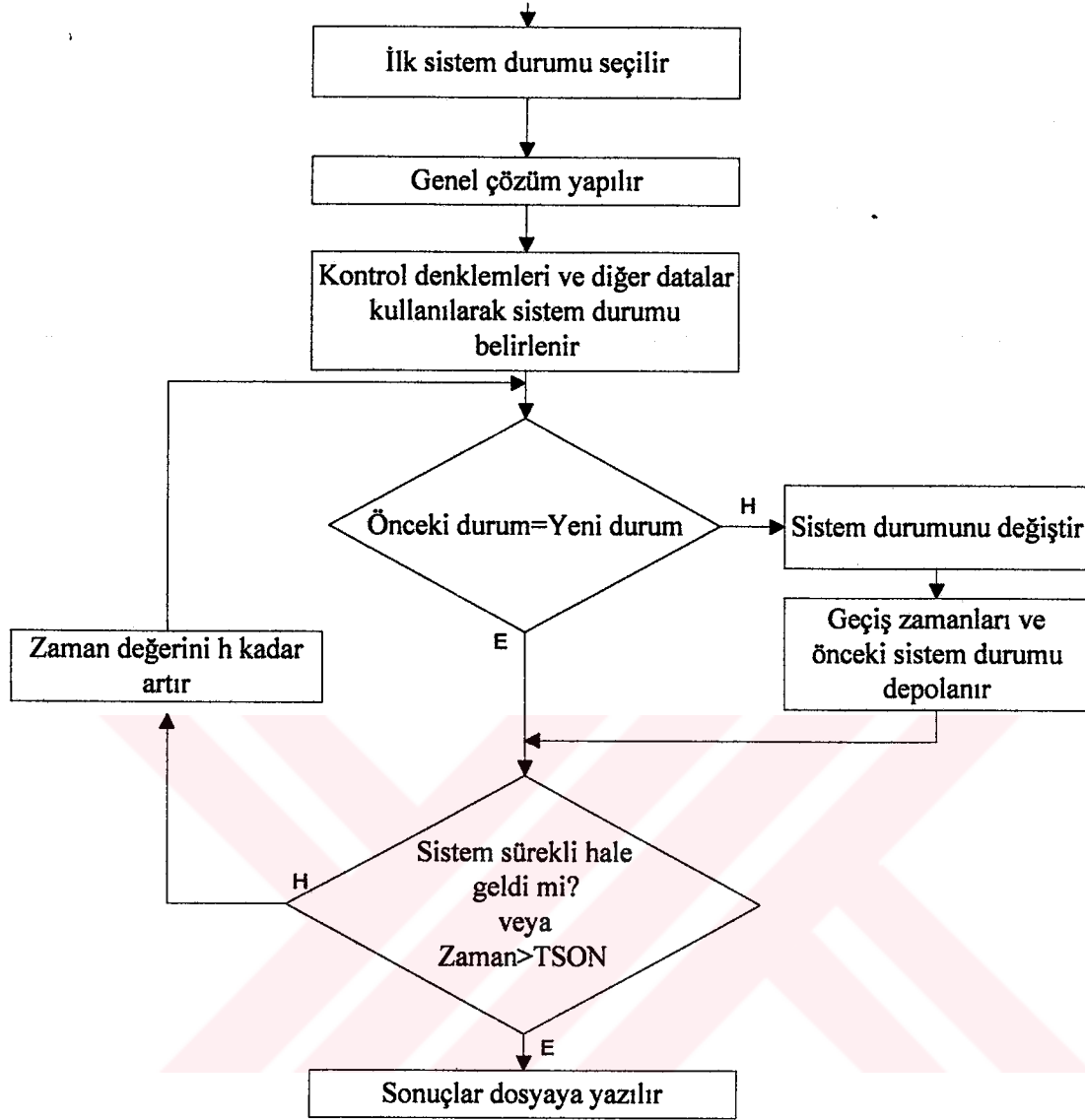
5.3. ANALİZ Programı

ANALİZ, bir ana program olup çeşitli altprogramlardan oluşur. Kullanıcı arabirimi ile datalar girildikten sonra Analizi Başlat seçeneğinin işaretlenmesiyle ANALİZ programı çalıştırılır ve sonuçlar elde edilir. ANALİZ programı sırasıyla; HAZIRLA, BONDENK, SDAP2, FORM2, COZUM ve DURUM altprogramlarını çağırılmaktadır. ANALİZ programı ve daha sonra anlatılacak DOSYA programının birleşmesinden oluşan işlevin akış şeması Şekil 5.4'de verilmiştir.

ANALİZ programıyla simülasyon yapılabilmesi için, incelenen sistemin bağlaç diyagramı modelinde en az bir anahtar ve herhangi bir sistem durumunda en az bir durum değişkeni bulunması gerekir. Sistemde anahtar bulunmadığında sistemin yapısını etkilemeyecek şekilde 0- yada 1-kapılarından istenen birine anahtar eklenerek bu problem aşılabılır. Modeldeki herhangi bir 0-kapısına $M_{EDAP} = [0]$ veya 1- kapısına $M_{EDAP} = [1]$ olan bir eleman eklendiğinde sistemin yapısında bir değişiklik olmayacaktır. Herhangi bir sistem durumunda durum değişkeni olmaması halinde ise modele ilave bir 0-kapısıyla birlikte bir hayali kapasitör veya indüktans eklenerek en az bir durum değişkeni olması sağlanabilir.

Öncelikle sistemin girebileceği durumların ve durumlar arası geçişlerin hangileri olabileceğinin belirlenmesi gerekir. Bu işlem yapıldıktan sonra bağlaç diyagramı modelindeki datalardan ilk sistem durumu için Denklem (4.7)'de verilen düğümler matrisi oluşturulur ve Denklem (4.15) ile verilen başlangıç denklemleri bulunur. Buradan Denklem (4.17) ve (4.18)'deki durum ve çıkış denklemlerinin katsayıları hesaplanır. Bütün sistem durumları için durum ve çıkış denklemleri hesaplandıktan sonra sistem durumları arasındaki geçişler için Denklem (4.21) ve (4.22)'de verilen anahtarlama denklemleri bulunur. Sistem durumları arasın-





Şekil 5.4. BONDAN Programının akış şeması

daki bütün geçişler için bu işlem gerçekleştirilir. Daha sonra durum ve çıkış denklemleri Denklem (4.38) ve (4.39)'da verilen formüller kullanılarak çözdürülür. Hangi sistem durumunda bulunduğu ise, çözüm sonucundaki verilerin, kontrol eşitsizliklerinin ve Denklem (4.35) ile (4.36)'da verilen ifadelerin değerlendirilmesi sonucunda elde edilir. Sistem durumu değiştiğinde ise eski ve yeni durumlar SDURUM, geçiş anları ise TGEÇİS adlı vektörlerde depolanır. Bu bilgiler sistemin ana periyoduna göre değerlendirilir. Ana periyot sistemdeki kaynakların en küçük frekansa sahip olanına göre belirlenir. Durum değişkenlerinin sürekli hale ulaşmış ulaşmadığı, bir ana periyot süresi boyunca sistemin girdiği durumların bir önceki ana

periyot süresinde girilen sistem durumlarıyla kıyaslanması sonucu anlaşılmaktadır. Durum değişkenleri sürekli hale ulaştığında ise çözüm sonlandırılır.

İncelenen sistemde geçiş zamanları biliniyorsa, yani kontrol eşitsizlikleri kullanılmadığında, sistem durumları arasındaki geçiş süreleri kullanıcı tarafından verilmelidir.

ANALİZ programının çağırdığı altprogramlar ve tanımları aşağıdaki gibidir.

5.3.1. HAZIRLA Altprogramı

Bu altprogram kullanıcı tarafından girilen dataları düzenlemeyi ve ANALİZ programının bu dataları değerlendirebilmesine hazır hale getirmeyi sağlar. Kullanıcı arabiriminden alınan datalar ilgili değişkenlere bu altprogram tarafından atanır. Ayrıca değişkenler üzerinde düzenlemeler ve tip dönüşümleri yapılarak datalar uygun formlara getirilmektedir.

5.3.2. BONDENK Altprogramı

Bu altprogram bağlaç diyagramı datalarından faydalanan başlangıç denklemlerinin elde edilmesini sağlar. Doğrusal olmayan devrelerin durum ve çıkış denklemlerinin değişik bölgelerde bulunması ve bölgeler arası geçişlerde anahtarlama denklemlerinin hesaplanması için başlangıç denklemlerinin bulunması gerektiğinden, Demir [22] tarafından BADENK adında bir program geliştirilmiştir. BADENK programında devre dataları kullanılarak başlangıç denklemleri oluşturulmaktadır. BONDENK, BADENK altprogramının düzenlenmesiyle oluşturulan ve bağlaç diyagramı datalarının kullanılmasıyla başlangıç denklemlerinin elde edilmesini sağlayan bir altprogramdır.

5.3.3. SDAP2 Altprogramı

Demir [22] tarafından geliştirilmiş olan SDAP altprogramı EDAP matrisleri ile varsa kısıtlama bilgilerini kullanarak SDED ve SDAP matrislerini elde etmekteydi. Program FORTRAN diliyle yazılmış olup programda lineer olmayan bütün elemanlara ilişkin EDAP matrislerinin girişinin yapılması gerekiyordu. Bu çalışmada program hem MATLAB ortamına göre düzenlenmiş hem de elemanlara ait EDAP matrislerinin girilmediği durumda anahtarların pozisyonlarına göre (0 ve 1) oluşabilecek kombinasyonları (örneğin 3 anahtar için $2^3=8$ durum) kendiliğinden bulacak şekilde geliştirmiştir.

5.3.4. FORM2 Altprogramı

Başlangıç denklemlerinin bulunmasından ve sistem durumlarına göre anahtar pozisyonlarının belirlenmesinden sonra durum, çıkış ve anahtarlama denklemleri FORM2 altprogramı yardımıyla elde edilir. Daha önce Nacaroğlu [21] tarafından hazırlanan FORM altprogramı anahtarlama peryodu bilinen bir devrenin durum, çıkış ve anahtarlama denklemlerini hesaplıyordu. Dolayısıyla sistemin bulunduğu sistem durumundan, hangi sistem durumuna geçeceği biliniyordu ve anahtarlama denklemleri de sadece bu geçişler için hesaplanıyordu. Ayrıca bu altprogramda, çıkış vektörünün boyutu ve giriş kaynaklarının sayısı bir ile sınırlandırılmıştı. Demir [22] tarafından geliştirilen bu altprogram ile sistemin bulunduğu sistem durumundan, hangi sistem durumuna geçileceği bilinmediğinden, mümkün olan tüm geçişler için anahtarlama denklemleri hesaplanacak şekilde genelleştirilmiştir. Ayrıca Demir tarafından bu altprogram çıkış vektörünün boyutu ve giriş kaynaklarının sayısı, sınırlandırılmayarak istenildiği kadar seçilecek şekilde geliştirilmiştir. FORTRAN diliyle gerçekleştirilen bu altprogram MATLAB ortamında düzenlenmiştir.

5.3.5. COZUM Altprogramı

Bu altprogram adından da anlaşılacağı gibi verilen t zaman değerleri için durum uzay gösterimi belli olan sistemin genel çözümünü elde etmeyi sağlar. Daha önce verilen Denklem (4.38) ve (4.39) ile durum ve çıkış denklemlerini çözdürür. COZUM altprogramı her sistem durumunda o duruma ait bilgileri kullanır. Sistemde birden fazla kaynak olduğunda veya kaynaklar birden fazla kaynağın toplamı şeklinde ifade edilebiliyorsa her kaynağa ait cevap ayrı ayrı elde edilir ve daha sonra bu cevaplar toplanarak durum ve çıkış denklemlerinde kaynaklardan dolayı oluşan toplam çözüm bulunur.

5.3.6 DURUM Altprogramı

Bu altprogram COZUM altprogramı ile elde edilen verilerle, kontrol eşitsizlikleri datalarını ve dışardan kontrollü elemanlara ait bilgileri değerlendirerek o anki sistem durumunun bulunmasını sağlar. Kontrol eşitsizlikleri çıkış değişkeni olarak seçilen değişkenlere göre düzenlendiğinden bu denklemlerin değerlendirilmesi kolaylıkla yapılabilir. Bunun yanı sıra kontrol eşitsizliklerini birbirine bağlayan bağlaçlar ve dışardan kontrollü elemanlara ait datalar da bu altprogramda değerlendirilir. DURUM altprogramı sistem durumlarında kalma süreleri kullanıcı tarafından girilmediği durumda çağrılmamaktadır.

5.4. DOSYA Programı

Bu program; analiz ve çözüm için gerçekleştirilmiş olan ANALİZ programının çalışması ile elde edilen değişimlerin ekrana grafiksel olarak çizdirilmesini, bu bilgilerin istenildiğinde dosyaya yazdırılmasını ve komut satırında durum ve çıkış denklemlerinin katsayılarının görüntülenmesini sağlar. Ekrana çizdirilebilecek veriler durum ve çıkış değişkenlerinin zamana göre değişimidir. Bu grafiklerde anahtarlama anlarını görmek de mümkündür. Dosyaya yazdırılabilecek veriler ise her sistem durumundaki anahtar pozisyonları, durum ve çıkış denklemlerinin katsayıları ve özdeğerlerdir.



6. ÖRNEKLER

6.1. Giriş

Bu bölümde hazırlanan BONDAN programının özelliklerini ortaya koyabilmek için değişik örnekler verilmiştir. Örneklerin çoğu literatürden seçilmiş ve böylece karşılaştırma imkanı sağlanmıştır.

Birinci ve beşinci örnekler doğrusal olmayan direnç içeren uygulamalardır. Birinci örnekte EDAP Matrisi kullanmanın avantajı vurgulanmış ve beşinci örnekte ise EDAP Matrisi ile kısıtlama yapılabileceği gösterilmiştir. İkinci örnekte tristörlü bir devre ele alınmış ve programın devrede tristör gibi dışardan kontrollü eleman bulunduğu bir uygulamaya yönelik yeteneği ortaya konmuştur. Üçüncü örnekte, doğru akım motorunun normal yol alma ve frenlemesinin simülasyonu yapılmıştır. Bu örnekte, elektriksel ve mekanik kısmın bütün elemanlarının bağlaç diyagramı metodunda tek tür bir modelde gösterilmesinin avantajı vurgulanmıştır. Yine bu örnekte, kontrol eşitsizliğinin olmadığı ve anahtarlama anlarının dışarıdan girildiği duruma yönelik programın yeteneği gösterilmiştir. Dördüncü örnekte, yine bir doğru akım motorunun sürücü devresi ile hızının kontrolü uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu örnekte kısıtlama matrisi kullanılmış ve getirdiği avantajlar vurgulanmıştır. Altıncı ve son örnekte ise mekanik bir sistem ele alınmış ve programın, farklı enerji domenindeki sistemlere uygulanabileceği gösterilmiştir. Bütün örneklerle ilgili ayrıntılı bilgiler ve sonuçlar her örnekle ilgili olan bölümlerde verilmiştir.

6.2. Örnek 1

Bu örnekte daha önce literatürde yer alan ve doğrusal olmayan bir direnç içeren Şekil 6.1a'daki devre ele alınmıştır [22, 23, 56, 59, 60]. Bu devredeki doğrusal olmayan direncin i-v karakteristiği Şekil 6.1b'de verilmiştir. Bu karakteristiğe ilişkin uç denklemleri:

1. bölge için (S_1 kapalı, S_2, S_3 açık):

$$I_{R_N} = G_1 \cdot (V_{R_N} - V_1) \quad (6.1)$$

2. bölge için (S_1, S_2, S_3 açık):

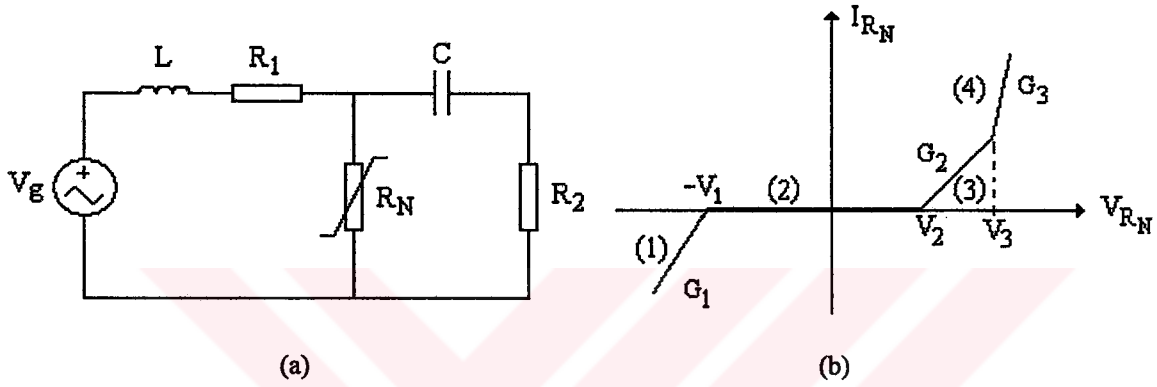
$$I_{R_N} = 0 \quad (6.2)$$

3. bölge için (S_2 kapalı, S_1, S_3 açık):

$$I_{R_N} = G_2 \cdot (V_{R_N} - V_2) \quad (6.3)$$

4. bölge için (S_3 kapalı, S_1, S_2 açık):

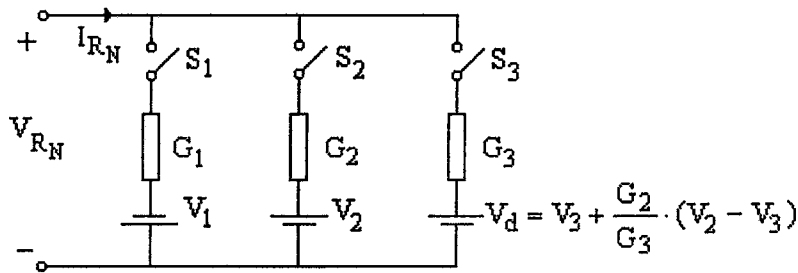
$$I_{R_N} = G_3 \cdot V_{R_N} - (G_3 - G_2) \cdot V_3 - G_2 \cdot V_2 \quad (6.4)$$



Şekil 6.1. (a) Örnek 1'e ilişkin devre ve (b) lineer olmayan direncin akım-gerilim karakteristiği

Eşdeğer devre Şekil 6.2'deki gibi elde edilir. Burada $G_1=19\text{mS}$, $G_2=17\text{mS}$, $G_3=0.16\text{S}$, $V_1=11\text{V}$, $V_2=5.25\text{V}$ ve $V_3=10.5\text{V}$ tur.

$$M_{EDAP}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 6.2. Şekil 6.1b'deki karakteristiğe ilişkin eşdeğer devre

$Y = [V_{R_N}]$ olmak üzere devreye ilişkin kontrol denklemleri:

1. sistem durumunda:

$$[-1] \cdot [Y] \geq [11] \quad (6.5)$$

2. sistem durumunda:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq \begin{bmatrix} -11 \\ -5.25 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

3. sistem durumunda:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq \begin{bmatrix} 5.25 \\ -10.5 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

4. sistem durumunda:

$$[1] \cdot [Y] \geq [10.5] \quad (6.8)$$

$$Z^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, F^1 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

şeklindedir. Şekil 6.1a'daki devrede doğrusal olmayan direncin yerine Şekil 6.2'deki eşdeğer devresi bağlanırsa Şekil 6.3a'daki yeni devre elde edilir. Bu devrede $L=69\text{mH}$, $C=12\mu\text{F}$, $R_L=25\Omega$, $R=100\Omega$, $V_g = 20 \cdot \sin(\omega \cdot t)$, $R_1=52.63\Omega$, $R_2=58.82\Omega$, $R_3=6.25\Omega$, $V_1=11\text{V}$, $V_2=5.25\text{V}$, $V_d=9.94\text{V}$ ve kaynağın frekansı 50Hz 'dir. Şekil 6.3b'de ise yeni devrenin bağlaç diyagramı modeli görülmektedir.

Dataların bağlaç diyagramı modelinden programa nasıl girildiği Bölüm 3'de anlatılmıştı. Buna göre Şekil 6.3b'de bağlaç diyagramı ile birlikte kapılarının numaralandırılması ve elemanların hangi sırayla girildiği görülmektedir. Buradaki numaralandırılmaya göre bağlaç diyagramı dataları ve diğer datalar aşağıdaki gibi hazırlanır.

Bağlaç diyagramı dataları:

$$\text{BKV} = [1, 0, 1, 1, 1, 1]$$

$$\text{ES} = [3, 0, 3, 3, 3, 2]$$

$$\text{ET} = ['\text{GK}, \text{L}, \text{R}, \text{S}, \text{R}, \text{GK}, \text{S}, \text{R}, \text{GK}, \text{S}, \text{R}, \text{GK}, \text{R}, \text{C}']$$

Şekil 6.3a'daki yeni eşdeğer devreden görüldüğü üzere anahtarların pozisyonlarına bağlı olarak sekiz farklı durum olmasına rağmen, doğrusal olmayan direncin dört ayrı durumu olduğu için, devre sadece bu durumlarda bulunabilir.

Ek 1.1'deki çıktıya göre durum ve çıkış denklemleri aşağıda verilmiştir.

1. bölge (S_1 kapalı, S_2, S_3 açık):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -545.98 & 28735 \\ -4.997 & -862 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 545.98 & 0 & 0 \\ 14.49 & -9.495 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_1 \\ V_2 \\ V_d \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.345 & 34.48 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.655 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_1 \\ V_2 \\ V_d \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

2. bölge (S_1, S_2 ve S_3 açık):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 83333.33 \\ -14.49 & -1811.59 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14.49 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_1 \\ V_2 \\ V_d \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 100 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_1 \\ V_2 \\ V_d \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

3. bölge (S_2 kapalı, S_1, S_3 açık):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -524.7 & 30863 \\ -5.367 & -899 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 524.7 & 0 & 0 \\ 14.49 & 0 & -9.125 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_1 \\ V_2 \\ V_d \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

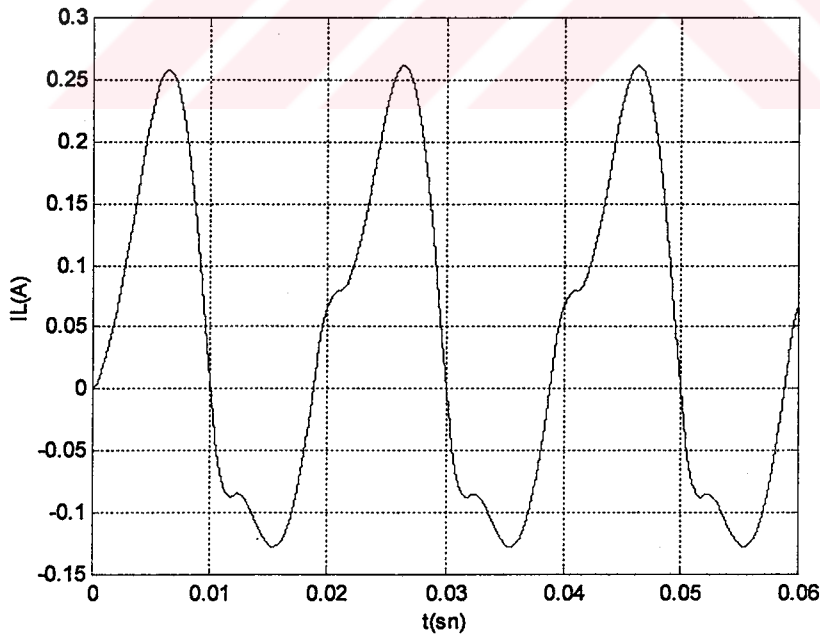
$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.37 & 37.03 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.629 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_1 \\ V_2 \\ V_d \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

4. bölge (S_3 kapalı, S_1, S_2 açık):

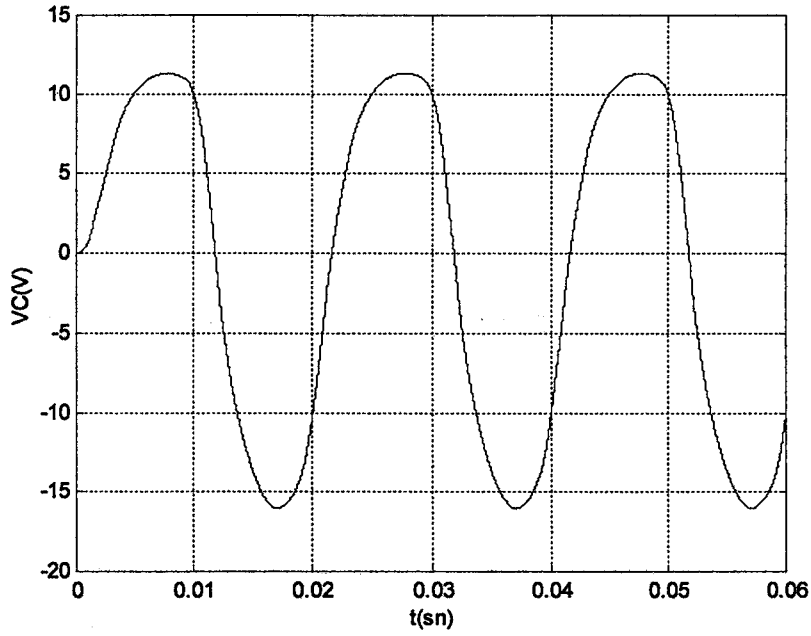
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -784.31 & 4901.96 \\ -0.852 & -447.57 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 784.31 \\ 14.49 & 0 & 0 & -13.64 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_1 \\ V_2 \\ V_d \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0588 & 5.88 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.94 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_1 \\ V_2 \\ V_d \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

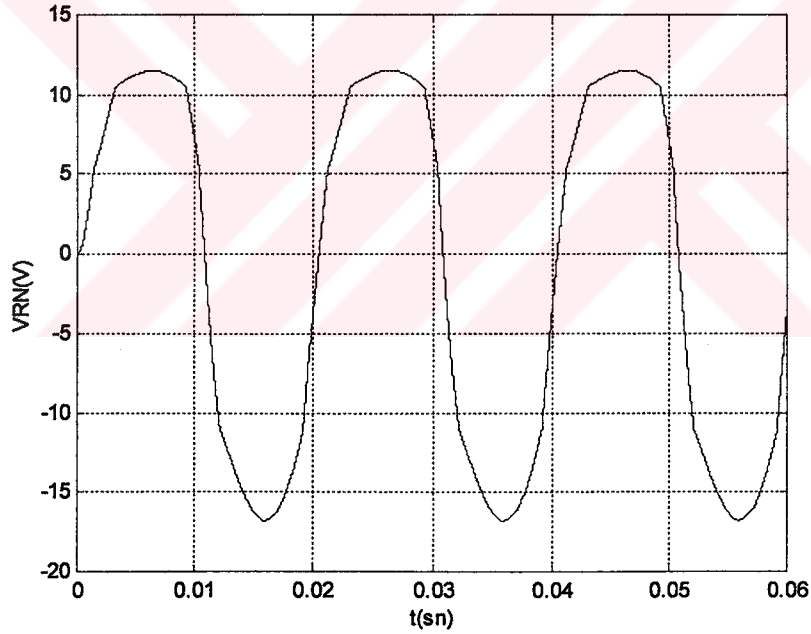
Devrenin çözümü sonunda indüktans akımı (I_L), kapasitör gerilimi (V_C) ve lineer olmayan direncin gerilimi (V_{RN}) Şekil 6.4a,b ve c'de görülmektedir.



(a)



(b)

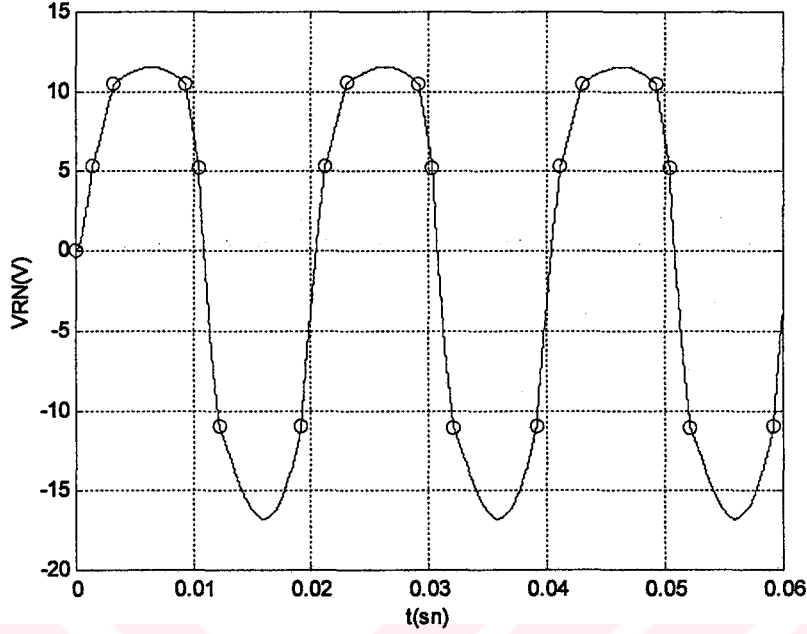


(c)

Şekil 6.4. (a) İndüktans akımı (I_L), (b) kapasitör gerilimi (V_C) ve (c) lineer olmayan direncin geriliminin (V_{RN}) zamana göre değişimi

Bölüm 3’de anahtarlama anlarının çözüm sonuçlarında gösterilebildiğinden bahsedilmişti. Şekil 6.5’de doğrusal olmayan direncin gerilim değişimi üzerinde anahtarlama anları gösterilmiştir. Buradan, anahtarlama anlarının doğrusal olmayan direncin karakteristiğiyle

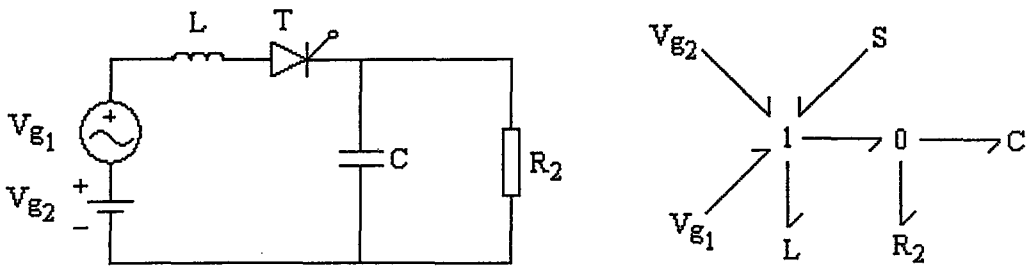
uyumlu olduğu gözlenebilmektedir.



Şekil 6.5. Doğrusal olmayan direncin geriliminin değişiminde anahtarlama anlarının görünümü

6.3. Örnek 2

Bu örnekte [23, 56]'da da incelenen Şekil 6.6a'daki devre ele alınmıştır. Bu devrede doğrusal elemanların yanı sıra bir de tristör bulunmaktadır.



Şekil 6.6. (a) Örnek 2'ye ilişkin devre, (b) devrenin bağlaç diyagramı modeli

Devredeki tristör en basit eşdeğeri olan ideal bir anahtarla modellenmiştir. Tristöre ilişkin EDAP Matrisi Bölüm 3'de verildiğinden burada tekrarlanmayacaktır. Devrede $L=20\text{mH}$, $C=22\text{nF}$ ve $R_2=1\text{k}\Omega$ 'dur. Kaynaklardan $V_{g1}=10 \cdot \sin(\omega \cdot t + \pi/6)\text{V}$ ve $V_{g2}=10\text{V}$ olup V_{g1} 'in frekansı 5 kHz dir.

Devre iki farklı durumda bulunabilir ve devreden görüldüğü gibi tristör iletimde iken I_L ve V_C , tristör kesimde iken sadece V_C kapasitör durumu değişkeni olmaktadır. Programda her sistem durumunda mevcut olan durum değişkenleri ve elenen durum değişkenleri göz önüne alınmaktadır. Devrede durum değişkeni olabilecek bütün kapasitör gerilimleri ve indüktans akımları program içerisinde çıkış değişkeni olarak seçildiğinden, her zaman değeri için değişimleri programda elde edilmektedir.

Tristör için aşağıdaki kontrol denklemleri kullanılmıştır.

Tristörün 1. durumunda (kesim):

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_T \\ I_T \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

Tristörün 2. durumunda (iletim):

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_T \\ I_T \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

Tristör $0.02 \cdot 10^{-4}$ sn de tetiklenmektedir. Bu durumda tristörün 2. durumu sadece 1 kez zamanla ilgilidir.

$$Z^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, F^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, T = [0.02 \cdot 10^{-4}]$$

Şekil 6.6b'de devrenin bağlaç diyagramı modeli görülmektedir. Programa girilen datalar ise aşağıda sıralanmıştır.

BKV=[1, 0], ES=[4, 2]

ET=['GK, GK, L, S, C, R']

ED=[20E-3, 22E-9, 1E+3]

BK1=[0, 0, 1, 0, 1, 1]

BK2=[1, 1, 0, 1, 0, 0]

CV=['VT, IT'], CBV=['V4, I4'], CM=[1 0; 0 1]

KT=['AC, DC'], KG=[10, 10], KFAZ=[pi/6], KFRK=[5E+3]

Z=[1 0; 1 0], F=[0, 1], T=[0.02E-4]

NES=1, MEDAP=[0 1]

MKONTROL=[-1 0; 0 -1; 1 0; 0 1], VKONTROL=[0; 0; 0; 0]

Yukarıdaki datalarla program çalıştırıldığında durum ve çıkış denklemleri Ek 1.2'deki gibi elde edilmiştir. Ek 1.2'ye göre durum ve çıkış denklemleri:

1. durumda (tristör kesimde):

$$\frac{d}{dt}[V_c] = [-4.54 \cdot 10^4] \cdot [V_c] + [0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

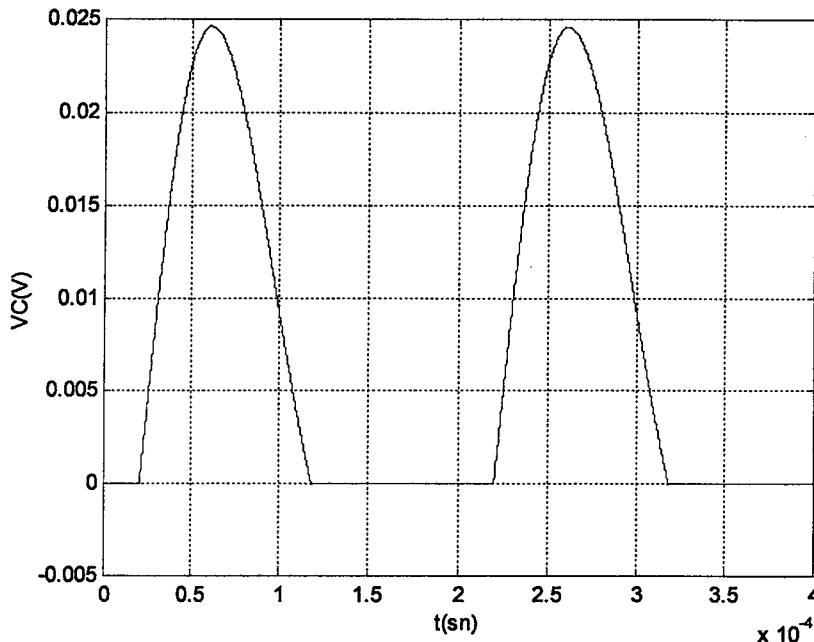
$$\begin{bmatrix} V_T \\ I_T \\ V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [V_c] + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

2. durumda (tristör iletimde):

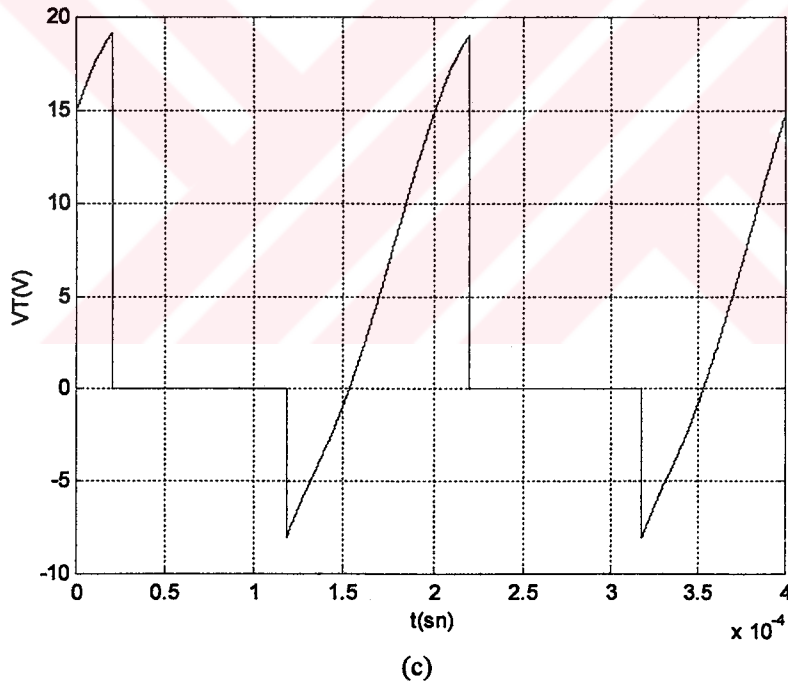
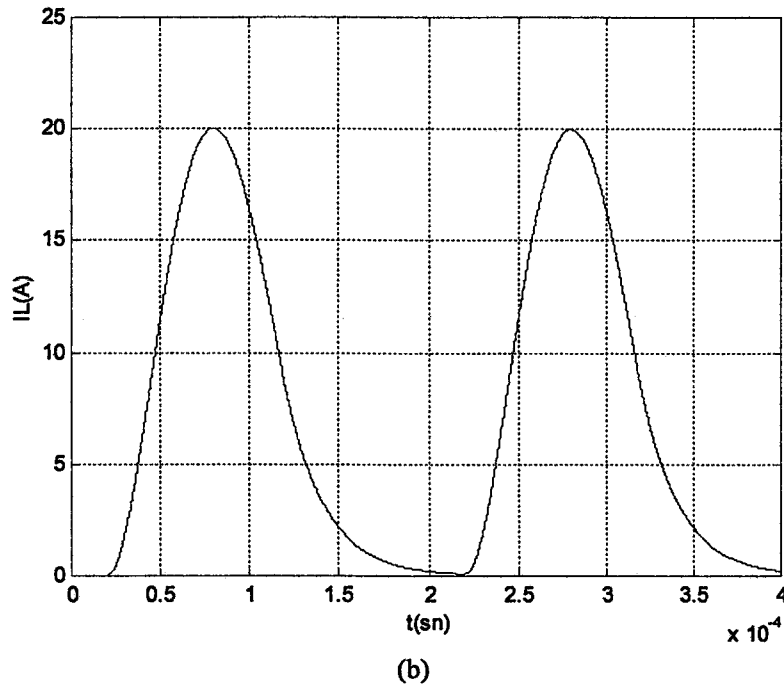
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.54 \cdot 10^4 & 4.54 \cdot 10^7 \\ -50 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 50 & 50 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

$$\begin{bmatrix} V_T \\ I_T \\ V_c \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Devrenin çözümü sonunda kapasitör gerilimi (V_c), indüktans akımı (I_L) ve tristör geriliminin (V_T) zamana göre değişimi Şekil 6.7a,b ve c'de görülmektedir.



(a)



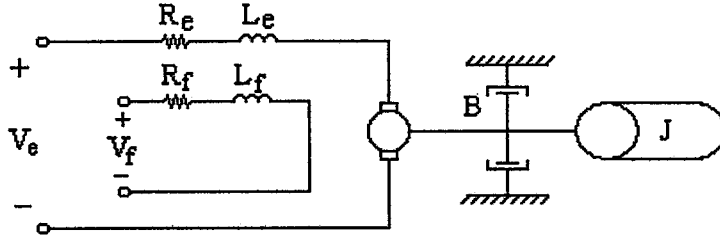
Şekil 6.7. (a) Kapasitör gerilimi (V_C), (b) indüktans akımı (I_L) ve (c) tristör geriliminin (V_T) zamana göre değişimi

6.4. Örnek 3

Bu örnekte Şekil 6.8’de verilen serbest uyarmalı bir doğru akım motorunun frenleme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama için aşağıda verilen bazı ihmal ve varsayımların

yapılması gerekmektedir [61].

1. Fırçalar nötr konumdadır.
2. Endüvi reaksiyonu ihmal edilmektedir.
3. Doyma ihmal edilmektedir.
4. Makine parametreleri sabit olup ısı ve akımla değişmemektedir.
5. Tüm kayıplar hıza bağlı değildir. Bunlar endüvi direnci R_e içinde gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Serbest uyarmalı doğru akım motoru

Devreye ilişkin parametreler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

V_e : Endüvi gerilimi (200V)

R_e : Endüvi direnci (2Ω)

L_e : Endüvi endüktansı (0.03H)

I_e : Endüvi akımı

V_f : Uyarma gerilimi

R_f : Uyarma devresi direnci

L_f : Uyarma devresi endüktansı

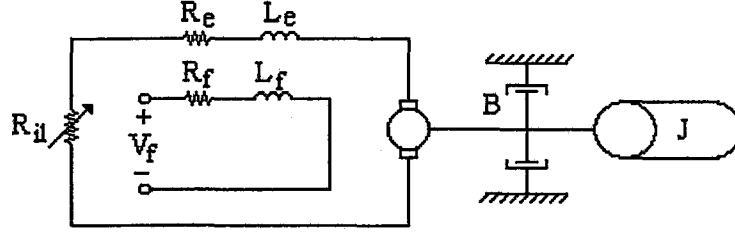
K : EMK (veya moment) sabiti (2 V/rad/sn veya Nm/A)

J : Atalet katsayısı (0.4 kg-m^2)

B : Sürtünme katsayısı (0.4 N/m/sn)

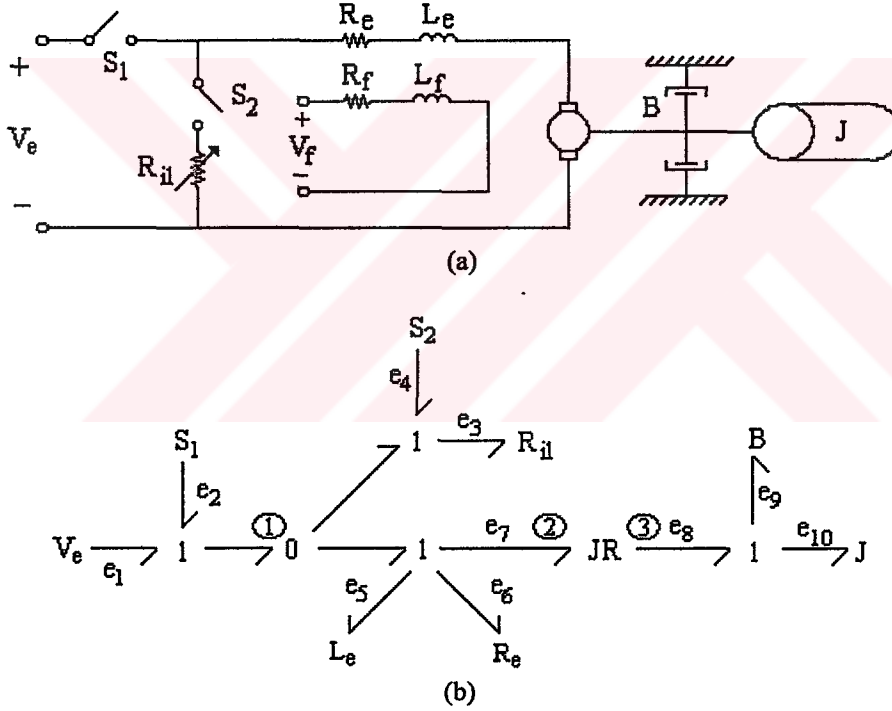
ω : Açısal hız (rad/sn^2)

Bu örnekte doğru akım motorunun direnimsel frenleme yöntemi kullanılmıştır. Serbest uyarmalı doğru akım motorunun direnimsel frenlemesi normal motor bağlantısında değişiklik gerektirir. Motor çalışmadan direnimsel çalışmaya geçiş için Şekil 6.9'daki gibi uyarma sargısının şebeke ile olan bağlantısı korunurken endüvinin şebeke ile olan bağlantısı kesilir ve değeri ayarlanabilen kademeli bir direnç üzerinden kapatılır [62].



Şekil 6.9. Serbest uyarımlı doğru akım motorunun direnimsiz frenlemesi

Normal çalışma ve frenleme durumlarının simülasyonunu gerçekleştirmek amacıyla Şekil 6.10a'daki gibi bir anahtarlı devre tasarlanmıştır. Normal çalışmada S_1 anahtarı kapalı, S_2 anahtarı açık, frenleme için ise S_1 anahtarı açık, S_2 anahtarı kapalı olacaktır. Frenleme öncesi motorun nominal hıza ve akıma ulaşması için bir süre normal çalışma incelenmiş ve sonra frenlemeye geçilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.10. (a) Doğru akım motorunun direnimsiz frenlemesi için eşdeğer devre ve (b) devrenin bağlaç diyagramı modeli

Doğru akım motorunun frenleme için düzenlenmiş eşdeğer devresinin bağlaç diyagramı modeli Şekil 6.10b'de görülmektedir. Burada, elektriksel bileşenlerin bulunduğu 1-bağlantı elemanı, mekanik bileşenlerin bulunduğu kapıya bir jirator üzerinden bağlanmaktadır. Bağlaç diyagramı tekniği ile bütün elemanlar tek tür bir modelle gösterildiğinden, bu örnekte metodun bir özelliği açıkça görülmektedir.

Bu uygulamada kontrol eşitsizliği kullanılmamıştır. Çünkü anahtarların açık ve kapalı kalma süreleri ile anahtarlama anları önceden belirlidir. ZGV olarak adlandırılan vektörle her durumda kalma süresi sırasıyla girilmektedir. Anahtarların pozisyonlarına göre sistemin sırasıyla hangi durumlarda bulunduğu ise, bu tür uygulamalarda EDAP Matrisi ile tanımlanmaktadır.

$$M_{EDAP} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Şekil 6.11b'de bağlaç diyagramı datalarının programa nasıl girildiği de gösterilmiştir. Burada jirator'den dolayı kapıların nasıl numaralandırılma şekli daha önceki örneklerden farklı olduğundan ayrıntılı çizim yapılmıştır. Buna göre datalar aşağıdaki gibidir.

$$BKV=[1, 0, 1, 1, 2, 1], ES=[2, 0, 2, 2, 1, 2]$$

$$ET=['GK, S, R, S, L, R, JR, R, L'], ED=[4, 0.03, 2, 2, 0.4, 0.4]$$

$$BK1=[0, 0, 1, 0, 1, 1, 2, 3, 3], BK2=[1, 1, 0, 1, 2, 2, 3, 0, 0]$$

$$CV=['VK'], CM=[1], CBV=['V1']$$

$$KT=['DC'], KG=[200]$$

$$NES=1, NEDAP=1, MEDAP=[1,0; 0,1], ZGV=[2, 4]$$

Yukarıdaki datalarla program çalıştırıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. durumda (Normal Çalışma, S₁ kapalı, S₂ açık):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -66.67 & -66.67 \\ 5 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 33.33 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_e \quad (6.23)$$

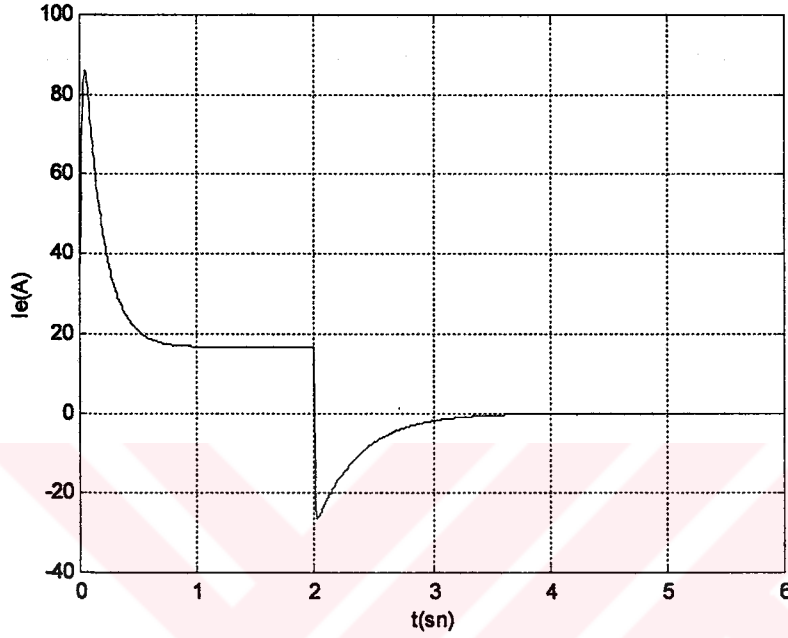
$$\begin{bmatrix} V_e \\ I_e \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_e \quad (6.24)$$

2. durumda (Frenleme, S₁ açık, S₂ kapalı):

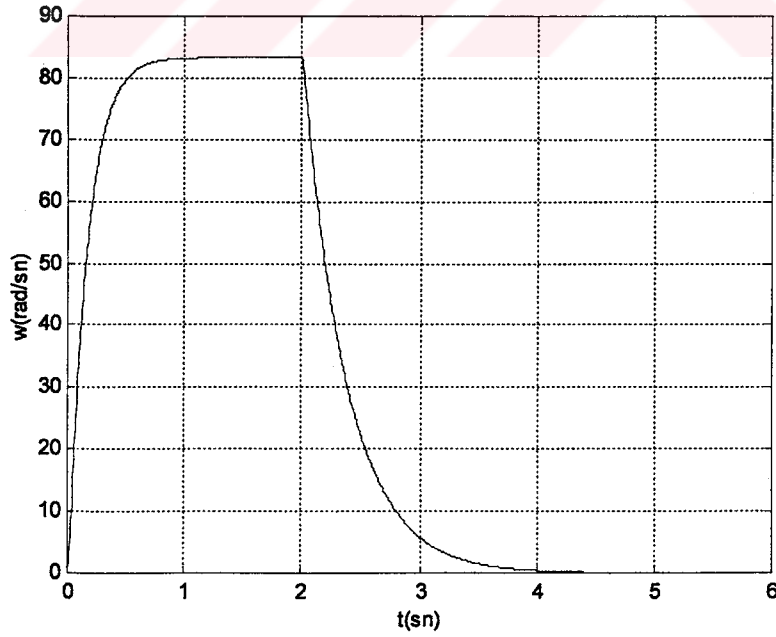
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -200 & -66.67 \\ 5 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

$$\begin{bmatrix} V_e \\ I_e \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_e \quad (6.26)$$

Motor endüvi akımı ve hız, kalıcı değerine ulaşınca kadar normal çalıştırılmış ve daha sonra frenlemeye geçilmiştir. ZGV vektöründen de anlaşılağı gibi 1. sistem durumunda 2 sn, 2. sistem durumunda ise 4 sn kalınarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.11a ve b'de program çıktıları görölmektedir.



(a)

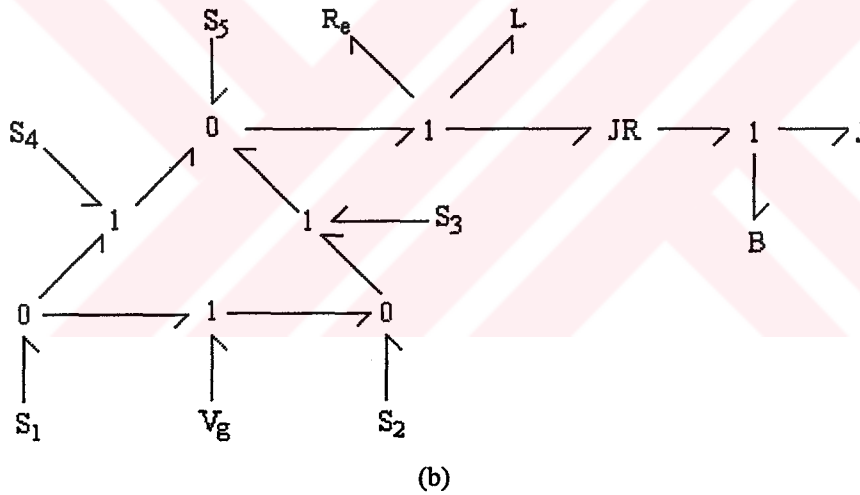
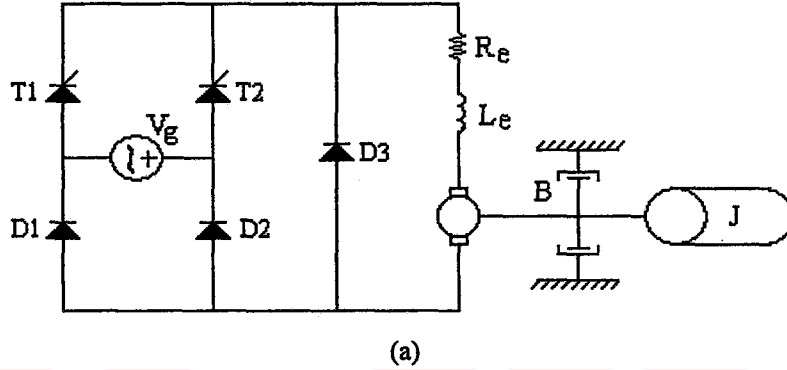


(b)

Şekil 6.11. (a) Endüvi akımının (I_e) ve açısal hızın (w) zamana göre değişimi

6.5. Örnek 4

Bu örnekte Şekil 6.12'deki tek fazlı yarım kontrollü tam dalga doğrultucu ile beslenen bir doğru akım motoru incelenmektedir. Kaynağın pozitif alternansında T_1 , negatif alternansında ise T_2 tetiklenir. Burada tetikleme açısı α nın değerine bağlı olarak, motorun endüvisine uygulanan gerilimin ortalama değeri değiştirilerek motorun hızı kontrol edilebilir.



Şekil 6. 12. (a) Örnek 4'e ilişkin devre ve (b) devrenin bağlaç diyagramı modeli

Devredeki tristörler ve diyotlar özellikle kısıtlama matrisinin önemini göstermek için en basit model olan ideal anahtarlar olarak alınmıştır. Sistemde $R_e=2\Omega$, $L_e=0.15H$, $B=0.4Nm/rad/sn$, $J=0.4 kg \cdot m^2$, $K=1.5 V/rad/sn$ olarak verilmiştir. Şekil 6.31'deki sistemde D_3 boşluk diyotu, $V_g = 220 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ve frekans 50Hz'dir.

Şekil 6.24'de sistemin bağlaç diyagramı modeli görülmektedir. Modelde S_1 ve S_2 sırasıyla D_1 ve D_2 diyotlarına, S_3 ve S_4 ise yine sırasıyla T_2 ve T_1 tristörlerine karşılık gelmektedir. S_5 ise D_3 boşluk diyotunu göstermektedir.

Devrede bazı kısıtlamalara gitmek mümkündür. Devreden T_1 ile D_2 'nin ve T_2 ile D_1 'in aynı anda 2. durumlarında olmaları ve T_1 ile D_3 'ün ve T_2 ile D_3 'ün de aynı anda 2. durumlarında olmamaları gerektiği görülmektedir. Ayrıca T_1 ile D_1 veya T_2 ile D_2 'nin de aynı anda 2. durumlarında olamayacağı da açıktır. Buna göre kısıtlama sayısı $NK=6$ dır ve kısıtlama matrisi:

$$MKT = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & D_1 & D_2 & D_3 \\ \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

şeklinde. Böylece devrede 32 yerine 4 sistem durumu mümkün olmaktadır. Sistem durumlarına ait açıklamalar aşağıda verilmiştir.

1. ve 2. Güç İletim Bölgesi: Sistem durumlarından ikisi güç iletim bölgesi olarak adlandırılır. Bu durumda tristörlerden biri, D_1 veya D_2 diyotlarından biri ile birlikte iletimdedir ve motorun endüvisi kaynak gerilimine doğrudan bağlıdır. Tristör ve diyotlardan T_1 ve D_2 veya T_2 ve D_1 aynı anda iletimde olabilir.

3. Kısa Devre Bölgesi: Bu bölgede T_1 , T_2 , D_1 ve D_2 yarı iletken elemanlarından hiçbirisi iletimde değildir. Dolayısıyla motorun kaynaktan beslenmediği bir bölgedir. Bu durumda motor akımı D_3 diyotu üzerinden dolaşır.

4. Sıfır Akım Bölgesi: Motorun kaynak tarafından beslenmediği ve boşluk diyotunun da kesimde olduğu bölgedir. Motor kendi ataleti ile döner ve endüvi akımı sıfırdır [63].

Çıkış değişkenleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$Y = \begin{bmatrix} I_{T_1} \\ I_{T_2} \\ V_{D_1} \\ V_{D_2} \\ V_{D_3} \\ I_e \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

Doğrusal olmayan elemanlara ait kontrol denklemleri:

1. elemanın (T_1) 1. durumunda:

$$[-1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot [Y] \geq [-0.02] \quad (6.28)$$

1. elemanın 2. durumunda:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq [0.02] \quad (6.29)$$

2. elemanın (T₂) 1. durumunda:

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq [-0.02] \quad (6.30)$$

2. elemanın 2. durumunda:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq [0.02] \quad (6.31)$$

3. elemanın (D₁) 1. durumunda:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq [0] \quad (6.32)$$

3. elemanın 2. durumunda:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq [0] \quad (6.33)$$

4. elemanın (D₂) 1. durumunda:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq [0] \quad (6.34)$$

4. elemanın 2. durumunda:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq [0] \quad (6.35)$$

5. elemanın (D₃) 1. durumunda:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq [0] \quad (6.36)$$

5. elemanın 2. durumunda:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq [0] \quad (6.37)$$

$$Z^1 = Z^2 = Z^3 = Z^4 = Z^5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, F^1 = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], T = [3.33E-3, 13.33E-3]$$

Programa girilen datalar ise aşağıda sıralanmıştır.

$$BKV = [0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 2, 1]$$

$$ES = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 2]$$

$$ET = ['S, GK, S, S, S, S, R, L, JR, R, L'], ED = [2, 0.15, 1.5, 0.4, 0.4]$$

$$BK1 = [0, 1, 0, 2, 1, 0, 3, 3, 4, 5, 5]$$

$$BK2 = [1, 2, 2, 3, 3, 3, 4, 4, 5, 0, 0]$$

CV=[' IT1, IT2, VD1, VD2, VD3'], CBV=['I3, I4, V1, V2, V5']
 CM=[1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0; 0 0 1 0 0; 0 0 0 1 0; 0 0 0 0 1]
 MKONTROL=[-1 0 0 0 0; 1 0 0 0 0; 0 -1 0 0 0; 0 1 0 0 0; 0 0 -1 0 0; 0 0 1 0 0; 0 0 0 -1 0;
 0 0 0 1 0; 0 0 0 0 -1; 0 0 0 0 1]
 VKONTROL=[-0.02; 0.02; -0.02; 0.02; 0; 0; 0; 0; 0; 0]
 Z=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0], F=[0 1 0 1], T=[3.33E-3 13.33E-3]
 KT=['AC'], KF=[50], KG=[220]
 NK=6, NES=5, MKT=1
 MKT=[1 2 0 2 0 0; 1 0 2 0 2 0; 0 2 2 0 0 0; 0 0 0 2 2 0; 0 2 0 0 0 2; 0 0 2 0 0 2]
 TSON=2

BONDAN programı ile durum ve çıkış denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

1. durumda (Güç iletim bölgesi, T₂ ve D₁ iletimde, T₁, D₂, D₃ kesimde):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -13.33 & -10 \\ 3.75 & -6.25 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -6.667 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_k \quad (6.38)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_k \quad (6.39)$$

2. durumda (Güç iletim bölgesi, T₁ ve D₂ iletimde, T₂, D₁, D₃ kesimde):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -13.33 & -10 \\ 3.75 & -6.25 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 6.667 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_k \quad (6.40)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_k \quad (6.41)$$

3. durumda (Kısa devre bölgesi , D₃ iletimde T₁, T₂, D₁ ve D₂ kesimde):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1.5 \\ 1.5 & -2.5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_k \quad (6.42)$$

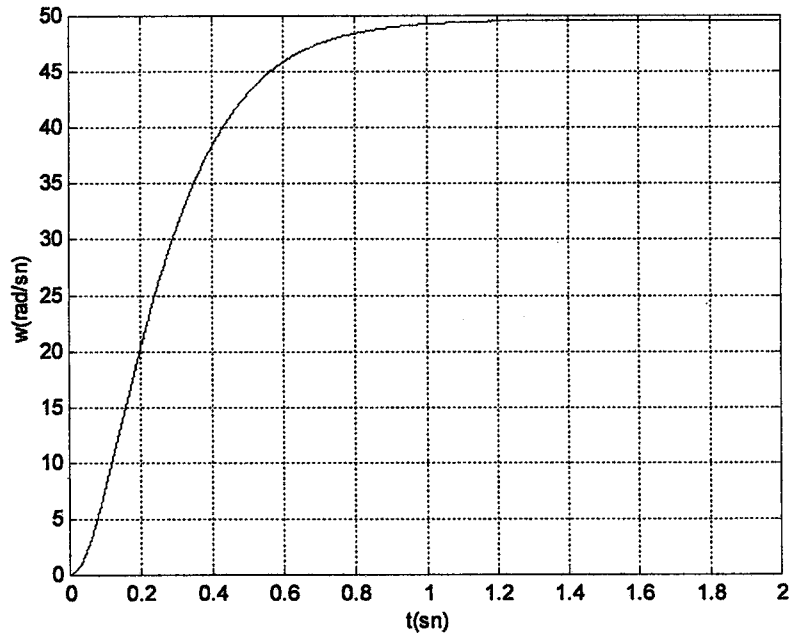
$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_e \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_k \quad (6.43)$$

4. durumda (Sıfır akım bölgesi T₁, T₂, D₁, D₂ ve D₃ kesimde):

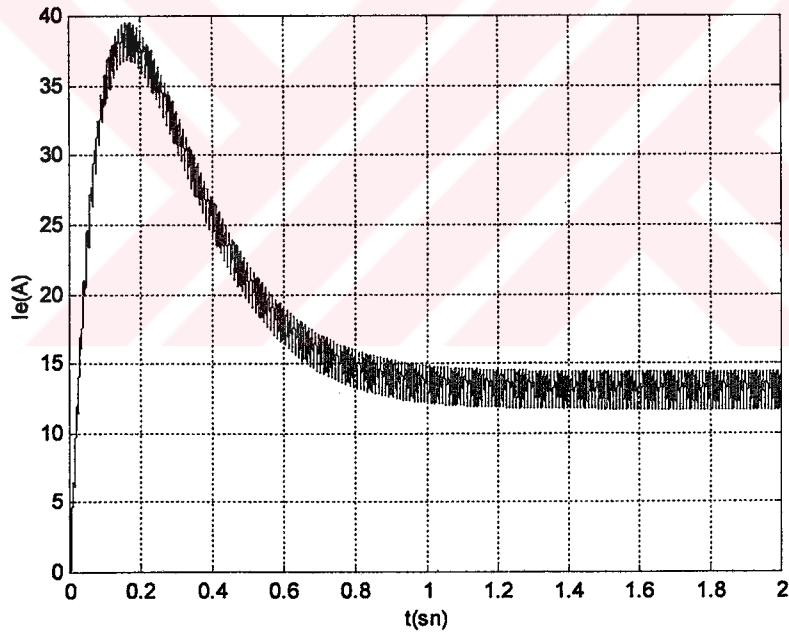
$$\frac{d\omega}{dt} = [-1] \cdot \omega \quad (6.44)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [\omega] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_k \quad (6.45)$$

Tetikleme açısı 60° için program çıktıları ise Şekil 6.13a ve b'de görülmektedir. Tetikleme açısına göre motorun hızının nasıl değiştiğini gözlemlemek amacıyla, açı 30° yapılarak program bir kez daha çalıştırılmış ve Şekil 6.14'deki sonuç elde edilmiştir. Tetikleme açısının hıza etkisini gözlemlemek için bir önceki açı değerinde elde edilen sonuçla birlikte çizdirilmiştir.

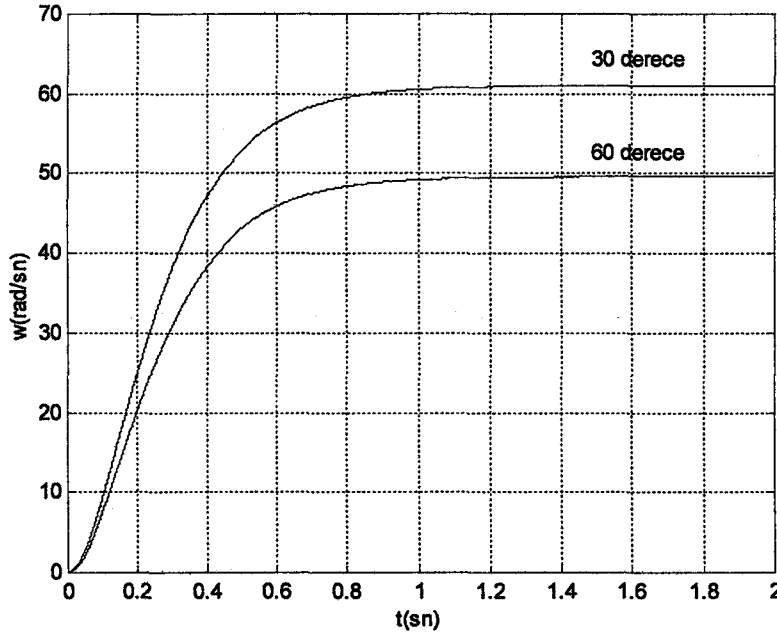


(a)



(b)

Şekil 6.13. (a) Açılal hızın (ω) ve (b) endüvi akımının (I_e) zamana göre değışimi



Şekil 6.14. Tetikleme açısının açısal hıza etkisi

6.6. Örnek 5

Bu örnekte Şekil 6.15’de görülen Chua devresi ele alınmıştır. Bu devre, çeşitli kaotik davranışlar sergileyen basit bir osilatör devresi olup; üç tane enerji depolayan eleman, bir doğrusal ve bir de doğrusal olmayan dirençten ibarettir. Bu devrede R_N ile gösterilen doğrusal olmayan direncin akımı, geriliminin bir fonksiyonu olduğu için gerilim kontrollü direnç olarak adlandırılır. Doğrusal olmayan direncin i-v karakteristiği ve bu karakteristiği temsil eden eşdeğer devre Şekil 6.16’daki gibidir. Şekil 6.16a’daki karakteristiğe ilişkin uç denklemleri:

1. bölge için (S_1 açık, S_2 kapalı):

$$I_R = G_b \cdot (V_R - E) + G_a \cdot E \quad (6.46)$$

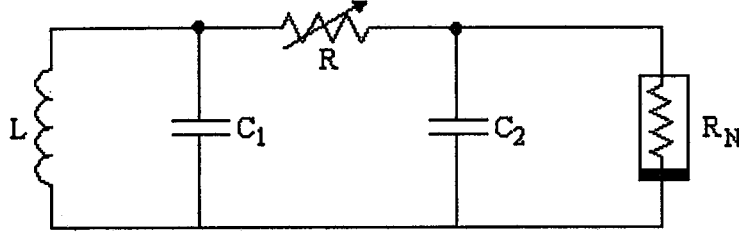
2. bölge için (S_1, S_2 açık):

$$I_R = G_a \cdot V_R \quad (6.47)$$

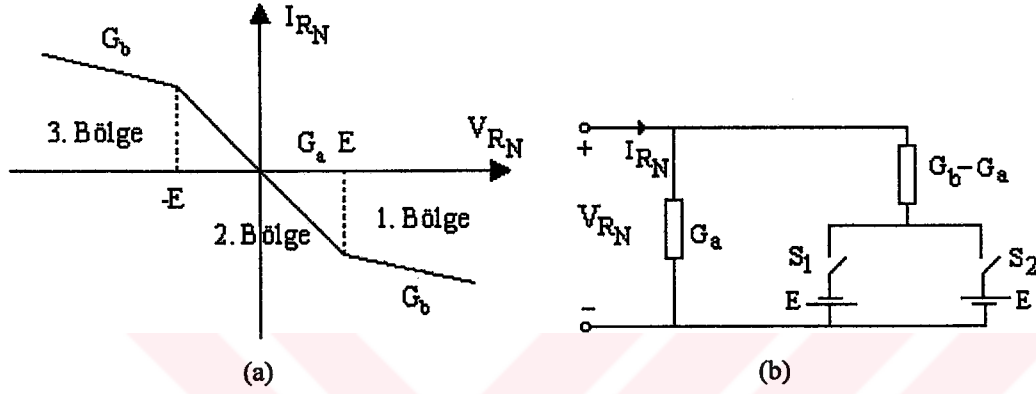
3. bölge için (S_1 kapalı, S_2 açık):

$$I_R = G_b \cdot (V_R + E) - G_a \cdot E \quad (6.48)$$

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**



Şekil 6.15. Örnek 5'e ilişkin devre



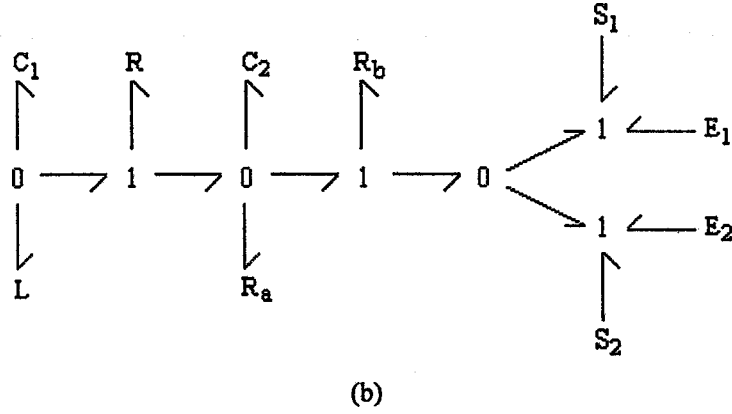
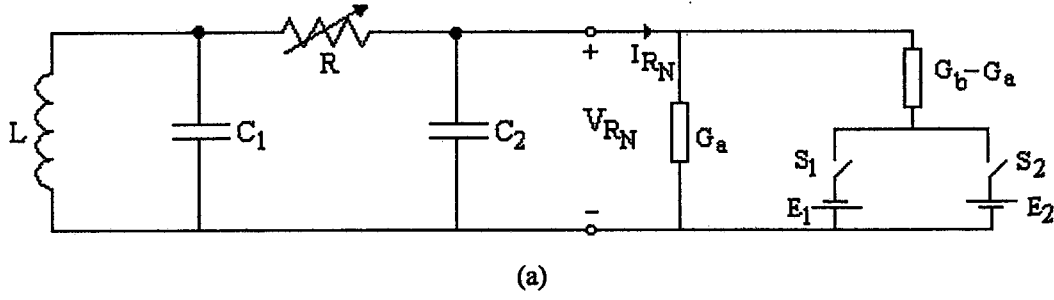
Şekil 6.16. Doğrusal olmayan direncin (a) karakteristiği ve (b) eşdeğer devresi

S_1 ve S_2 anahtarlarının pozisyonlarına göre devrenin girebileceği dört ayrı durum mevcuttur. Fakat doğrusal olmayan direncin karakteristiğine göre devre üç farklı durumda bulunabilir. Bu durumda EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

şeklindedir. Daha önce de bahsedildiği gibi EDAP Matrisi ile kısıtlama yapılabilmekteydi. Şekil 6.16b'de görülen eşdeğer devredeki anahtarların her ikisinin de kapalı olduğu durum, EDAP Matrisi ile kısıtlanmıştır.

Doğrusal olmayan direncin Şekil 6.16b'de görülen eşdeğeri Şekil 6.15'de bu elemanın yerine bağlanırsa Şekil 6.17a'daki devre elde edilir. Bu devrede $L=18\text{mH}$, $C_1=100\text{nF}$, $C_2=10\text{nF}$, $R=0-2\text{K}\Omega$, doğrusal olmayan dirence ait değerler ise $G_a = -0.7576\text{mS}$, $G_b = 0.4091\text{mS}$, $E=1\text{V}$ 'tur. Oluşan yeni devrenin bağlaç diyagramı modeli ise Şekil 6.17b'de görülmektedir. Burada $R_a = 1/G_a$, $R_b = 1/(G_b - G_a)$ dir.



Şekil 6.17. (a) Yeni eşdeğer devre ve (b) devrenin bağlaç diyagramı modeli

$Y = V_{C_2}$ olmak üzere kontrol denklemleri:

1. bölge için:

$$[1] \cdot [Y] \geq 1 \quad (6.49)$$

2. bölge için:

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [Y] \geq \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (6.50)$$

3. bölge için:

$$[-1] \cdot [Y] \geq 1 \quad (6.51)$$

$$Z^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, F^1 = [0 \ 0 \ 0]$$

Programa girilen dataalar aşağıda verilmiştir.

$$BKV = [0, 1, 0, 1, 0, 1, 1]$$

$$ES = [2, 1, 2, 1, 0, 2, 2]$$

$$ET = ['L, C, R, R, C, R, S, GK, S, GK'], ED = [18e-3, 100e-9, 1755, -1.32e+3, 10e-9, 2.874e+3]$$

BK1=[1, 1, 1, 2, 2, 2, 0, 0, 0, 0], BK2=[0, 0, 2, 0, 0, 3, 3, 3, 3, 3]
 CV=['VC'], CM=[1], CBV=['V5'], KT=['DC,DC'], KG=[-1, 1]
 NES=1, NEDAP=1, MEDAP=[0 1; 0 0; 1 0]
 MKONTROL=[1 ;-1 ;1 ;-1], VKONTROL=[1; -1 ; -1 ;1], Z=[0 0 ;1 0; 0 0]
 TSON=6E-3, BD=[0 4 0]

Devredeki ayarlı direncin değerinin $R=1755\Omega$ olduğu durum için BONDAN programıyla elde edilen durum ve çıkış denklemleri aşağıdaki gibi bulunur.

1. bölge (S_1 açık, S_2 kapalı):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{C1} \\ \dot{V}_{C2} \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5698 & 5698 & -10^7 \\ 56980 & -16068 & 0 \\ 55.556 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 3,485 \cdot 10^4 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.52)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.53)$$

2. bölge (S_1 ve S_2 açık):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{C1} \\ \dot{V}_{C2} \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5698 & 5698 & -10^7 \\ 56980 & 18780 & 0 \\ 55.556 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.54)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.55)$$

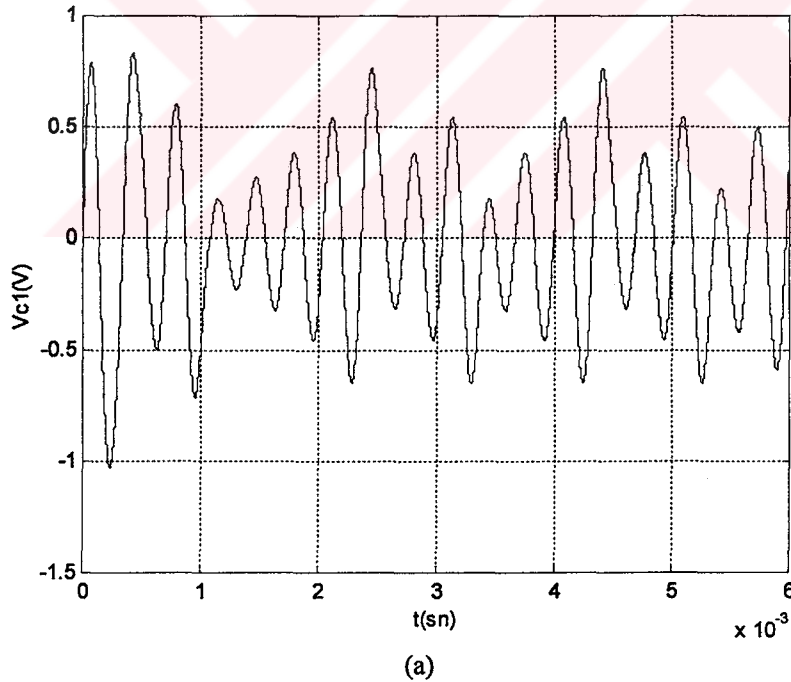
3. bölge (S_1 kapalı, S_2 açık):

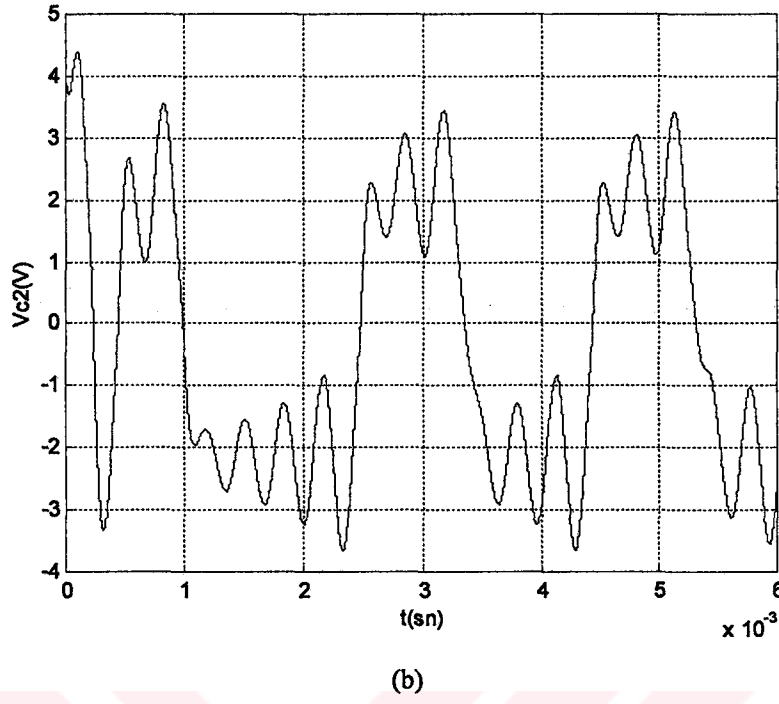
$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{C1} \\ \dot{V}_{C2} \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5698 & 5698 & -10^7 \\ 56980 & -16068 & 0 \\ 55.556 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 3,485 \cdot 10^4 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.56)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.57)$$

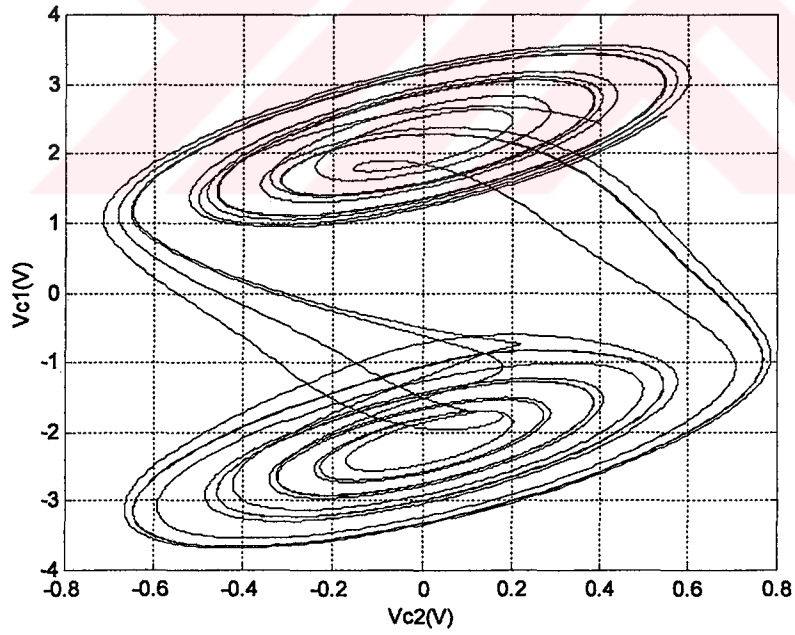
Kaotik sistemlerde her başlangıç değeri için kaos gözlenmeyebilir. Bu örnek için daha önce yapılmış analizlerden faydalanarak hem ayarlı direnç, hem de başlangıç şartları için kaosun gözlenebileceği değerler seçilmiştir. Buna göre ayarlı direnç $R=1755\Omega$ ve başlangıç şartları ise $V_{C1}(0)=0$, $V_{C2}(0)=4$, $I_L(0)=0$ olarak alınmıştır. Ayrıca devrede sürekli rejime girecek düzenli bir davranış olmadığından programın analizini sonlandırmak için analiz yapılan süreye kısıtlama getirilmiştir. Bu değer de TSON olarak programa girilmiştir.

Girilen data'lara göre devrenin analizi gerçekleştirildiğinde, C_1 ve C_2 kapasitörlerinin gerilimlerinin zamana göre değişimi sırasıyla Şekil 18a ve b'deki gibi elde edilmiştir. Kaotik davranış bu şekillerde görülmektedir. Chua devresinde görülebilecek iki ayrı kaotik davranış bulunmaktadır. Bunlardan birisi ikili kıvrımlı çekici türüdür. Bu davranış Şekil 6.19'daki gibi V_{C1} ve V_{C2} nin faz düzleminde çizdirilmesiyle gözlemlenmiştir.





Şekil 6.18. (a) C_1 kapasitör geriliminin (V_{C_1}) ve (b) C_2 kapasitör geriliminin (V_{C_2})
zamana göre değişimi



Şekil 6.19. İkili kıvrımlı çekici davranışı

Diğer bir kaotik davranış da spiral çekici türüdür. Bu davranış ayarlı direncin değerini artırdığımızda karşımıza çıkar. Aynı datalar kullanıldığında ve sadece ayarlı direncin değeri

$R=1950\Omega$ yapıldığında BONDAN programının bir kez daha çalıştırılmasıyla durum ve çıkış denklemleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

1. bölge (S_1 açık, S_2 kapalı):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{C1} \\ \dot{V}_{C2} \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5128.2 & 5128.2 & -10^7 \\ 5128.2 & -10370.5 & 0 \\ 55.556 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3,485 \cdot 10^4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.58)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.59)$$

2. bölge (S_1 ve S_2 açık):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{C1} \\ \dot{V}_{C2} \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5128.2 & 5128.2 & -10^7 \\ 5128.2 & 24478 & 0 \\ 55.556 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3,485 \cdot 10^4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.60)$$

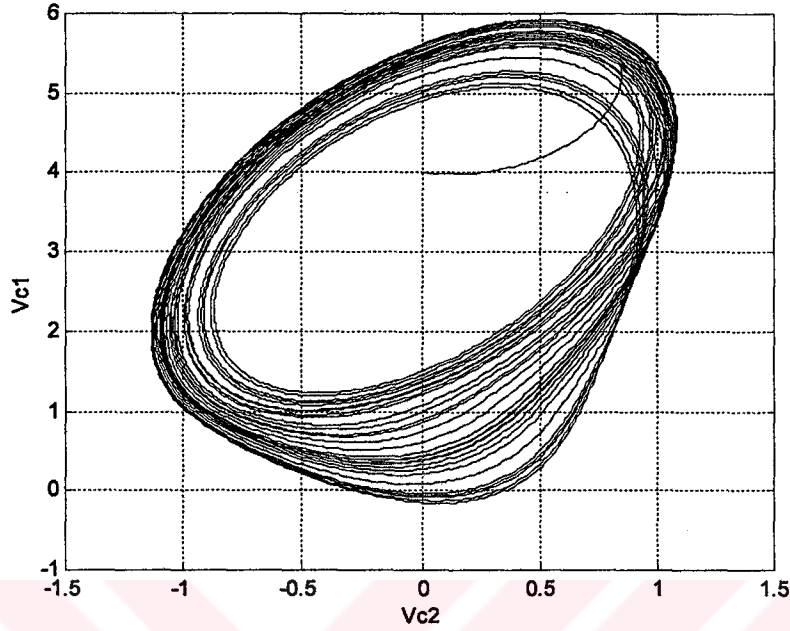
$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.61)$$

3. Bölge (S_1 kapalı, S_2 açık):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{C1} \\ \dot{V}_{C2} \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5128.2 & 5128.2 & -10^7 \\ 5128.2 & -10370.5 & 0 \\ 55.556 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3,485 \cdot 10^4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.62)$$

$$\begin{bmatrix} V_{RN} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (6.63)$$

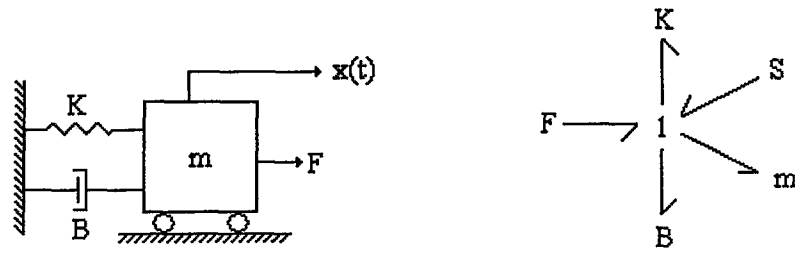
Spiral çekici davranışı ise, V_{C1} ve V_{C2} 'nin faz düzleminde çizdirilmesiyle Şekil 6.20'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 6.20. Spiral çekici davranışı

6.7. Örnek 6

Bu örnekte Şekil 6.21a'da görülen mekanik sistem ele alınmıştır. Sistem basit bir kütle, yay ve sürtünme elemanından oluşmaktadır ve sisteme dışardan F kuvveti etmektedir. Sistemde $B = 0.05 \text{ N/m/sn}$, $K = 1 \text{ N/m}$, $m = 1 \text{ kg}$, $F = 10 \text{ N}$ 'dur.



Şekil 6.21. (a) Örnek 6'ya ilişkin mekanik devre ve (b) bağlaç diyagramı modeli

BONDAN programıyla sistemde en az bir anahtar ve bir durum değişkeni olması durumunda simülasyon yapılabilir. Bu yüzden sisteme Şekil 6.21b'de görüldüğü gibi bir anahtar ilave edilmiştir. Anahtar hep kapalı pozisyonda olduğundan, sistemin yapısına herhangi bir etkisi yoktur. Sistemin bağlaç diyagramı modelinde 0-kapısı veya trafo/jirator bulunmadığından-

dan Bölüm 5’de anlatıldığı gibi 1-kapısı numaralandırılmıştır. EDAP Matrisi:

$$M_{EDAP} = [1]$$

olur. Program dataları aşağıda verilmiştir.

$$BKV=[1], ES=[5]$$

$$ET=['GK, R, L, C, S'], ED=[4, 0.03, 2, 2, 0.4, 0.4]$$

$$BK1=[0, 1, 1, 1, 0], BK2=[1, 0, 0, 0, 1]$$

$$CV=['v'], CM=[1], CBV=['I3']$$

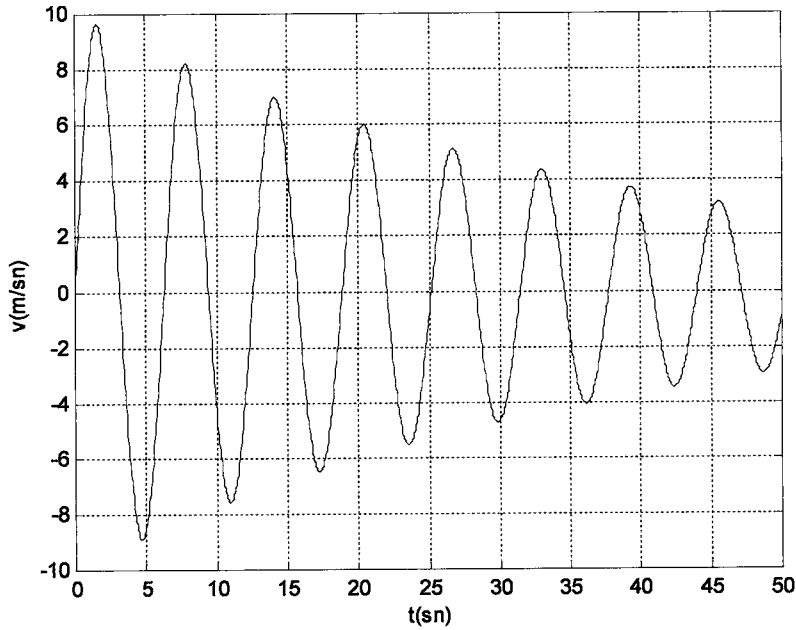
$$KT=['DC'], KG=[10], NES=1, NEDAP=1, MEDAP=[1], TSON=[50]$$

Çıkış değişkeni olarak kütlenin hızı alınmıştır. Yukarıdaki datalarla program çalıştırıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_K \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -0.05 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_K \\ I_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot F \quad (6.64)$$

$$\begin{bmatrix} v \\ V_K \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_K \\ I_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot F \quad (6.65)$$

Sistemdeki bütün elemanları aynı hızda hareket etmektedir. Hızın zamana göre değişimi Şekil 6.22’de görülmektedir.



Şekil 6.22. Hızın zamana göre değişimi

7.SONUÇLAR

7.1. Değerlendirme

Bu tezde bağlaç diyagramı tekniği ile anahtarlı devrelerin analizi ve simülasyonu için bir yöntem sunulmuştur ve bilgisayar programı geliştirilmiştir. Programın özelliklerini gösterebilmek amacıyla farklı örnekler için uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Lineer olmayan elemanlar, parça-parça lineerlik yaklaşımı kullanılarak anahtarlar ve lineer elemanlardan oluşan eşdeğer devrelerle modellenenilmektedir. Sistemdeki lineer olmayan elemanların sayısına bağlı olarak sistem durumlarının sayısı da artmaktadır. Fakat sistemde hiçbir zaman girilemeyecek durumlar mevcut olabilir yada devreler ve sistemler teorisine aykırı olup kısıtlanması zorunlu durumlar oluşabilir. Bu durumlar EDAP ve MKT Matrisleri ile kısıtlanarak sistem durumlarının sayısı azaltılır. Bunun sonucunda bilgisayar belleği ve zamanı daha ekonomik kullanılır.

Bu tezde geliştirilen program bağlaç diyagramı modelini kullanmaktadır. Günümüzde kullanılan bağlaç diyagramı yöntemi ile analiz gerçekleştiren programlar anahtarlı devrelerin analizinde bazı dezavantajlara sahiptirler. Bunlardan en önemlisi, farklı anahtar pozisyonları için farklı model girilmesi zorunluluğudur. Bu problem BONDAN programında ilgili matrisler kullanılarak aşılmıştır. Ayrıca anahtarın diğer bazı en sade halde ve fiziksel sistemlere daha uygun bağlaç diyagramı elemanları gibi programda modele eklenebilmesi programın önemli bir avantajı olarak görünmektedir. Ayrıca BONDAN programı durum değişkeni yada anahtar içermeyen devrelerde, davranışı etkilemeyecek şekilde hayali durum değişkeni veya hayali anahtar ilave edilerek analiz gerçekleştirilebilir.

7.2. Öneriler

Programın MATLAB paket programı ile hazırlandığı daha önce ifade edilmişti. Fakat C++, Pascal v.b. bilgisayar dilleriyle yazılmış olsaydı programın çalışma süresi daha kısa olurdu. Fakat yoğun matris işlemlerinden dolayı hafıza problemi yaşandığından ve MATLAB'ın da hazır fonksiyonlarından yararlanma avantajı düşünüldüğünden tercih bu yönde olmuştur.

Bundan sonraki aşamalarda yapılması düşünülen veya tavsiye edilen ise, programın kullanıcı arabiriminin bağlaç diyagramının çizilebileceği şekilde bir grafiksel ortama dönüştürülmesi ve data girişinin daha kolay yapılabilmesidir. Ayrıca bazı elektronik ve güç elektroniği elemanlarını, anahtar gibi ayrı bir eleman olarak programdaki tanımlamalara

eklemek ve bu elemanlar ait katalog verilerinin de kullanıcı tarafından girilebilmesi ile daha kapsamlı analizlere imkan sağlamak, ileriki çalışmalarda hedef alınabilecek gelişmeler olabilir. Durum değişkenlerinde süreksizliklerin olduğu durumlar için anahtarlama denklemlerinin kullanılması da önerilir. Programda anahtarlama denklemlerindeki katsayılar elde edildiğinden bu aşama kolaylıkla gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

1. Paynter, H.M., 1961, *Analysis and Design of Engineering Systems*, M.I.T. Press, Cambridge.
2. Karnopp, D. and Rosenberg R.C., 1968, *Analysis and Simulation of Multiport System*, M.I.T. Press, England.
3. Blundell, A., 1982, *Bond Graphs for Modeling Engineering Systems*, Ellis Harwood Lim., England.
4. Karnopp, D. and Rosenberg R.C., 1983, *Introduction to Physical System Dynamics*, Mc Graw-Hill, New York.
5. Karnopp, D., Margolis D.L. and Rosenberg R.C., 1990, *System Dynamics: A Unified Approach-2th Edition*, John Wiley, New York.
6. Cellier F.E., 1991, *Continuous System Modeling*, Springer-Verlag New York.
7. N. Sen, 1977, "The Simulation and Model of Dynamic Systems with Bond Graph", Journal of İ.T.Ü., Vol. 35-5.
8. Poyraz M., 1981, "Enzim Reaksiyon Sistemlerinin Otomatik Kontrol ve Sistem Analizi Yöntemleri ile Model ve Simülasyonu", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
9. Sueur C. and Dauphin-Tanguy G., 1989, "Structural Controllability/Observability of Linear Systems Represented by Bond Graph", J. Franklin Ins., Vol: 326, No.6, England, 869-883.
10. Yıldırım S., 1993, "Elektrik Devrelerinin Analizinde Bond Graf Modeli ve Simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
11. Wong, Y.K., Rad, A.B., 1998, "Bond graph simulations of electrical systems", Proceedings of EMPD '98. International Conference on, Volume: 1, 133 -138 .
12. Robisson, B., Ganascia, J.G., 2000, "On the representation of electrical networks Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol:1, 144 - 147.
13. Wong, Y.K., Rad, A.B., 1998, "Bond graph simulations of electrical systems", Proceedings of EMPD'98 International Conference Vol:1, 133 -138.
14. Chua, L.O., Desoer, C.A. and Kuh, E.S., 1987, *Linear and non-linear circuits*, Mc Graw Hill, Systems Analysis, Volume I, Singapore, 839p.
15. Kuo B.C., 1991, *Automatic control systems*, Prentice Hall Int., U. S. A.
16. Dervişoğlu, A., 1971, "State equations and initial values in active RLC network", IEEE Trans. Circuits Theory (Corresp.), Vol. CT-18: 544-547.
17. L.O. Chua, M. Hasler, F. Verburg, 1982, "Dynamics of A Piecewise Linear Resonant Circuits", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol: 29, 535-547.

18. Köksal M., 1984, "A fast convergent method for the analysis of nonlinear systems with periodic excitations", IEEE Int. Symp. On Circuit and Syst. Proc. Montreal-Canada, Vol: 3, 1362-1364.
19. M. Köksal, 1984, "Lineer Olmayan Sistemlerin Peryodik Çözümlerinin Bilgisayar Kullanarak Bulunması", 1.Ulusal Bilgisayar Destekli Tasarım Semp. Tebliğleri, İzmir, 431-442.
20. Köksal M., 1975, "Analysis and Applications linear Circuits Containing Periodically Operated Switches", PhD Thesis, ODTÜ, Ankara.
21. Nacaroglu A., 1989, "Computer Oriented Analysis of Linear Circuits Containing Periodically Operated Switches", Applications to Switching Capacitor Networks, PhD Thesis, ODTÜ, Gaziantep, Turkey, 278s.
22. Demir Y., 1993, "Lineer Olmayan Devrelerin Durum Denklemlerinin Değişik Bölgelerde Bulunması ve Bölgeler Arası Geçişler İçin Anahtarlama Denklemlerinin Hesaplanması", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 206s.
23. Herdem S., 1993, "Parça-Parça Doğrusal veya Dışardan Kontrollü Elemanlar İçeren Devrelerin Peryodik Çözümlerinin Bulunması", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 153s.
24. W. Borutzky, 1995, "Discontinuities in a Bond Graph Framework", J. Franklin Ins., Vol. 332 B, No.2, England, 141-154.
25. Asher G.M., 1993, "The Robust Moodelling of Variable Topology Circuits Using Bond Graph", Proceedings of SCS Conference ICBGM'93, San Diego, USA, 126-131.
26. W. Borutzky, 1995, "Representing discontuntinuites by sinks of fixed Causalities", Proceedings of SCS Conference ICBGM'95, San Diego USA, 65-72.
27. Cellier F.E., 1995, Otter M., Elmqvist H., "Bond Graph Modelling of Variable Structure Systems", Proceedings of SCS Conference ICBGM'95, Las Vegas, USA, 49-55.
28. Asher G.M. and Eslamdoost V., 1989, "Power Electronic Circuit Simulation using Bond Graph Techniques", EPE Congress Aachenn, 807-812.
29. Castelain A., Ducreux, J. P., Dauphin-Tanguy, G. and Rombaut, C., 1990, "Modeling and Analysis of Power Electronic Networks by Bond Graph", IMACS-TCI 90 Nancy, France, 405-410.
30. Ducreux J.P., Castelain A., Dauphin-Tanguy G., Rombaut C., 1993, "Power Electronics and Electrical Machines Modelling Using Bond Graphs", Bond Graphs For Engineers, Elsevier Science, Amsterdam.
31. J. Buisson, 1993, "Analysis of Switching Devices with Bond Graphs, Journal of the Franklin Institute", Vol. 330, No. 6, England, 1165-1175.
32. Lorenz F., 1993, "Discontinuities in Bond Graph: What is Required", Proceedings of SCS Conference ICBGM'93, San Diego USA, 137-142.

33. Y. Demir, M. Poyraz and M. Köksal, 1997, "Derivation of State and Output Equations for Systems Containing Switches and a Novel Definition of a Switch Using the Bond Graph Model", *Journal of the Franklin Ins.*, Vol.334B, No.2, 191-197.
34. M. Poyraz, Y. Demir, A. Gülten and M. Köksal, 1999, "Analysis of Switched-Systems Using the Bond Graph Methods", *J. Franklin Ins.*, Vol 336, England, 379-386.
35. M. Köksal and Y. Tokad, 1977, "State Space Formulation of Linear Circuits Containing Periodically Operated Switches", *Circuits Theory and Appl.*, Vol. 5, 155-170.
36. Idir, N., Bausiere, R., 1993, "Circuit oriented simulation of GTO thyristors using bond-graphs", *Systems, Man and Cybernetics, 'Systems Engineering in the Service of Humans', Conference Proceedings., International Conference on*, Vol.1:, 17-20 Oct. 579 -582
37. Besbes, K., 1997, "Modelling semiconductor devices using bond graph techniques, *Industrial Electronics*",. ISIE '97., *Proceedings of the IEEE International Symposium on*, Vol: 2, 7-11 July 201 -205.
38. Allard, B., Morel, H., Chante, J.P., 1993, "Reusing basic semiconductor region models in power device bond graph definition", *Power Electronics and Applications, 1993., Fifth European Conference on*, Vol.2, 13-16 Sep, 34 -39.
39. Allard, B., Morel, H., Chung-Chieh Lin, Helali, H., Chante, J.-P., 1994, "Rules for deriving basic semiconductor region models", *Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record., 25th Annual IEEE*, 20-25 June, 44 -51 vol.1.
40. Garcia, J., Dauphin-Tanguy, G., Rombaut, C., 1996, "Electrothermal bond graph model for semiconductor switching devices, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*",. APEC '96. *Conference Proceedings, Eleventh Annual*, Vol: 1, 3-7 March, 258 -263 vol.1.
41. Junco, S., Donaire, A., Garnero, G., 2002, "Speed control of series DC motor: a bond graph based backstepping design", *Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference on*, Vol: 3
42. Ghosh B.C., Bhadra S.N. 1993, "Bond Graph Simulation of A Current Source Inverter Driven Induction Motor(CSI-IM) System", *Electric Machines and Power Systems*, Vol:21, 51-67.
43. Asher G.M. and J.D.V. Borquez, 1987, "Dynamic Modelling of Csi Fed Synchronus Drives Using Bong Graphs", *EPE Congress, Grenoble*, 1099-1104.
44. Allard, B., Morel, H., Change, J.-P., 1992, "A novel simulation of power switching bipolar transistor", *Circuits and Systems., ISCAS '92. Proceedings., 1992 IEEE International Symposium on*, Vol: 2, 3-6 May, 754 -757.
45. Hales M.K., Rosenberg R.C., 2001, "ENPORT Model Builder: An Improved Tool for Multiport Modeling of Mechatronic Systems", *Proc. Intl. Conf. On Bond Graph Modeling*, SCS v.33,n.1,152-157.
46. Gülten A., 1996, "Dinamik Sistemlerin Bond Graf Modeli ve ENPORT Simülasyonu", *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ*, 40s.
47. Meerman J.W., 1988, *TUTSIM on IBM COMPUTER User's Manuel*, Netherlands.

48. Controllab Products, 1999, *20-SIM Reference Manuel, Version 3.0*, Enschede, Netherlands.
49. Broenink J.F., "Modelling Simulation and Analysis with 20-SIM", Journal A 38, No:3(Sept), 16-19.
50. Broenink J.F., 1997, "Bond Graph Modeling in MODELICA", European Simulation Symposium, Passau, Germany, Oct 19-22.
51. Modelica, 1997, *A Unified Object Oriented Language for Physical Systems Modeling*.
52. Dynasim., 1994, *Dymola-User's Manuel Dynasim AB*, Research Park Ideon, Lund, Sweden.
53. Granda J.J., Reus J., 1997, "New Developments in Bond Graph Modeling Software Tools: The Computer Aided Modeling Program Camp-G and MATLAB", The IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Hatt Orlando, Orlando, Florida, USA, October 12-15, vol:2, 1542-1547.
54. Delgado, M., Sira-Ramirez, H., 1995, "Modeling and simulation of switch regulated dc-to-dc power converters of the boost type", Devices, Circuits and Systems, Proceedings of the 1995 First IEEE International Caracas Conference on, 12-14 Dec., 84 -88.
55. Delgado M., Brie C., 1991, "DESI-A Modelling and Simulation Package for Linear Systems Based on Bond Graphs", Proceedings of the 5th IFAC/IMACS Symposium on Computer Aided Design in Control Systems, UK.
56. Türkbeyler E., 1987, "A New Approach for the Analysis of Power, Electronic Networks by Treating such Networks as Linear Circuits Containing POS", Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Gaziantep.
57. M. Köksal and Y. Tokad, 1976, "On the solution of linear circuits containing periodically operated switches", Proc. European Conf. On Circuits Theory and Design, Vol:1, 77-82.
58. Mathworks, 1999, *MATLAB 5.3*, Natick, Massachusetts.
59. Köksal M., Türkbeyler E., 1987, "Peryodik Sinyaller İle Uyarılmış Lineer Olmayan sistemlerin Analizi İçin Çabuk Yakınsayan Yeni Bir Metod", XI. Yöney. Araş. Kong. Bildiri Kitabı: XV-21, XV-30, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
60. Türkbeyler E., Köksal M., 1988, "Periodic Steady State Solutions of Power Electronics Circuits", Proc. Int. AMSE Conf. On Modelling and Simulation, İstanbul, Turkey, Vol:2D, 93-104.
61. Aldemir R., 1977, "Doğru Akım makinelerinde Hız Kontrolü", 4. Bilim Kongresi Tebliğleri 24-28 Ekim Türkiye, 75-76.
62. Hindmarsh J., 1982, *Electrical Machines and Drives*, Pergamon International Library, England.
63. Kılıcı T, Köksal M., 1987, "Simulation and Control of DC Motors by Semiconductor Drives", Proceedings of the IASTED Int. Symp. Simulation, Modelling and Development-SMD'87, Cairo, Egypt, March 3-5, 139142.

ÖZGEÇMİŞ

Arif GÜLTEN

Fırat Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
23119, Elazığ

Tel: 424-2370000- 6350
agulten@firat.edu.tr

- 1970** Elazığ 'da doğdu.
- 1987-1993** Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu.
- 1993-1996** Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında “Dinamik Sistemlerin Bond Graf Modeli ve ENPORT Simülasyonu” konusunda yaptığı tez çalışması ile Yüksek Mühendis derecesini aldı.
- 1995-** Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

EK 1.1

Örnek 1'e ilişkin bilgisayar çıktısı

*****SİMÜLASYON SONUÇLARI*****

ÇIKIŞ DEĞİŞKENLERİ

VRN,VC1,IL1

1. DURUM

S1 Kapalı(1) S2 Açık(0) S3 Açık(0)

DURUM DEĞİŞKENLERİ:

V14, I2

DURUM DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

-545.9827	28735.0674
-4.9974	-862.0591

DURUM DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000	545.9827	0.0000	0.0000
14.4928	-9.4954	0.0000	0.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

0.3448	34.4821
1.0000	0.0000
0.0000	1.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000	0.6552	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Özdeğerler: -704.021 + 344.419i -704.021 -344.419i

2. DURUM

S1 Açık(0) S2 Açık(0) S3 Açık(0)

DURUM DEĞİŞKENLERİ:

V14, I2

DURUM DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

0.0000	83333.3333
-14.4928	-1811.5942

DURUM DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14.4928	0.0000	0.0000	0.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

1.0000	100.0000
1.0000	0.0000
0.0000	1.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Özdeğerler: $-905.797 + 622.303i$ $-905.797 - 622.303i$

3. DURUM

S1 Açık(0) S2 Kapalı(1) S3 Açık(0)

DURUM DEĞİŞKENLERİ:

V14, I2

DURUM DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

-524.7030	30863.0315
-5.3675	-899.0672

DURUM DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000	0.0000	524.7030	0.0000
14.4928	0.0000	-9.1253	0.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

0.3704	37.0356
1.0000	0.0000
0.0000	1.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000	0.0000	0.6296	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Özdeğerler: -711.885 + 361.413i -711.885 -361.413i

4. DURUM

S1 Açık(0) S2 Açık(0) S3 Kapalı(1)

DURUM DEĞİŞKENLERİ:

V14, I2

DURUM DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

-784.3137	4901.9608
-0.8525	-447.5703

DURUM DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000	0.0000	0.0000	784.3137
14.4928	0.0000	0.0000	-13.6402

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

0.0588	5.8824
1.0000	0.0000
0.0000	1.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000	0.0000	0.0000	0.9412
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Özdeğerler: -771.409 -460.475

EK 1.2

Örnek 2'ye ilişkin bilgisayar çıktısı

*****SİMÜLASYON SONUÇLARI*****

ÇIKIŞ DEĞİŞKENLERİ

VT ,IT ,VC1,IL1

1. DURUM

S1 Açık(0)

DURUM DEĞİŞKENLERİ:

V5

DURUM DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

-45454.5455

DURUM DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000 0.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

-1.0000

0.0000

1.0000

0.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

1.0000 1.0000

0.0000 0.0000

0.0000 0.0000

0.0000 0.0000

Özdeğerler: -45454.545

2. DURUM

S1 Kapalı(1)

DURUM DEĞİŞKENLERİ:

V5 , I3

DURUM DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

-45454.5455 45454545.4545
-50.0000 0.0000

DURUM DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000 0.0000
50.0000 50.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KATSAYI MATRİSİ

0.0000 0.0000
0.0000 1.0000
1.0000 0.0000
0.0000 1.0000

ÇIKIŞ DENKLEMLERİNİN KAYNAK MATRİSİ

0.0000 0.0000
0.0000 0.0000
0.0000 0.0000
0.0000 0.0000

Özdeğerler: -22727.273 + 41907.020i -22727.273 -41907.020i

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**