

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ DOĞRU AKIM MOTORUNUN AYNI YÜKÜ BESLEMESİ
DURUMUNUN BOND GRAF YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

116 030

Abdulnasır YILDIZ

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK- ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

ELAZIĞ

2002

116650

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ DOĞRU AKIM MOTORUNUN AYNI YÜKÜ BESLEMESİ
DURUMUNUN BOND GRAF YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

Abdulnasır YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez, 28/08/2002 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~
İle Başarılı / ~~Başarısız~~ Olarak Değerlendirilmiştir.

(İmza)

Danışman

Doç.Dr. Mustafa POYRAZ

(İmza)

Jrd. Doç. Dr. Mehmet Özkulur

(İmza)

Yrd. Doç. Dr. Selçuk YILDIZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İKİ DOĞRU AKIM MOTORUNUN AYNI YÜKÜ BESLEMESİ DURUMUNUN BOND GRAF YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Abdulnasır YILDIZ

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimler Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2002, Sayfa: 55

Bu çalışmada, iki doğru akım motorunun aynı yükü beslemesi durumu bond graf yöntemiyle incelendi. Bu inceleme yapılırken iki doğru akım motorunun paralel ve seri bağlı durumları ayrı ayrı ele alındı. Bu amaçla önce bond graf modeli tanıtıldı. Daha sonra her iki sistemin bond graf modelleri elde edildi. Ardından bu modelleri kullanarak simülasyon yapan Enport programı ile sistemlerin endüvi akımları ve açısal hızlarının zamana göre değişimlerinin grafiksel sonuçları elde edildi. Son olarak da sistemlerin bond graf modelleri kullanılarak elde edilen Enport simülasyon sonuçlarının doğruluğunu göstermek için aynı sistemlerin Matlab simülasyon sonuçları elde edildi.

ANAHTAR KELİMELELER: Bond Graf, Enport, Matlab

ABSTRACT

Masters Thesis

**INVESTIGATION OF THE SITUATION OF THE FEEDING THE SAME LOAD
WITH TWO DIRECT-CURRENT MOTORS, BY BOND GRAPH METHOD**

Abdulnasır YILDIZ

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

2002, Page: 55

In this thesis, the case of the two direct-current motors feeding the same load was investigated by using the bond graph method. The series and parallel case of the two motors were investigated separately. For this aim, firstly, the bond graph method was introduced. Then, the bond graph models of the both systems were obtained. After then, the change of armature currents and angular velocities of the systems with respect to time was obtained graphically from the program of Enport simulation. Finally, to illustrate the accuracy of the results obtained from the Enport simulation of the systems by using the bond graph method, the Matlab simulations of the same systems were implemented, and results were compared.

KEY WORDS: Bond Graph, Enport, Matlab.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılmasında değerli fikirlerinden istifade ettiğim F.Ü. Müh. Fak. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanı değerli hocam Doç. Dr. Mustafa POYRAZ'a ; tavsiye ve önerilerinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Yine tez çalışmam süresince bana karşı göstermiş olduğu sabır ve desteklerinden dolayı eşim Dilek Karaman YILDIZ'a sonsuz şükranlarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	II
ABSTRACT.....	III
TEŞEKKÜR.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER.....	VII
TABLolar.....	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Sistem Modelleri.....	1
1.2. Bond Graf Konusundaki Çalışmalar.....	1
1.3. Bond Graf modelinin Sağladığı Yararlar.....	1
2. BOND GRAF TEKNİĞİ.....	3
2.1. Bond Graf'ın Tanımı.....	3
2.2. Enerji Kapıları.....	3
2.3. Kozalite (Nedensellik)	6
2.4. Fiziksel Sistemlerin Bond Graf Modelinin Elde Edilişi.....	10
2.4.1. Elektrik Devrelerinin Bond Graf Modelinin Elde Edilişi.....	10
2.4.2. Mekanik Sistemlerin Bond Graf Modelinin Elde Edilişi	13
2.4.3. Hidrolik Sistemlerin Bond Graf Modelinin Elde Edilişi	16
2.4.4. Karmaşık Bir Sistemin Bond Graf Modelinin Elde Edilişi	20
2.5. Bond Graf Modelinden Durum Denklemlerinin Elde Edilişi	22
2.6. Bond Graf Modeli İle Simülasyon Yöntemleri	25
3. ENPORT SİMÜLASYONU PROGRAMI	26
3.1. Genel Bilgi	26
3.2. Programın Çalışması	26

4. İKİ SERBEST UYARMALI DC MOTORUN AYNI YÜKÜ BESLEMESİ	
DURUMUNUN BOND GRAF YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ.....	29
4.1. Serbest Uyarmalı Doğru Akım Motoru Hakkında Genel Bilgi.....	29
4.2. Serbest Uyarmalı Bir DC Motorunun Bond Graf Yöntemiyle İncelenmesi.....	32
4.2.1. Motorun Bond Graf Modeli	33
4.2.2. Motorun Enport Simülasyon Sonuçları	33
4.2.3. Motorun Matlab Simülasyon Sonuçları	34
4.3.Seri Bağlı İki Serbest Uyarmalı DC Motorunun Aynı Yüğü Beslemesi	
Durumunun Bond Graf Yöntemiyle incelenmesi	36
4.3.1. Sistemin Eşdeğer Devresi ve Durum Denklemleri	36
4.3.2. Sistemin Bond Graf Modeli	38
4.3.3. Sistemin Enport Simülasyon Sonuçları	39
4.3.4. Sistemin Matlab Simülasyon Sonuçları	40
4.4. Paralel Bağlı İki Serbest Uyarmalı DC Motorunun Aynı Yüğü	
Beslemesi Durumunun Bond Graf Yöntemiyle İncelenmesi	41
4.4.1. Sistemin Eşdeğer Devresi ve Durum Denklemleri.....	42
4.4.2. Sistemin Bond Graf Modeli	43
4.4.3. Sistemin Enport Simülasyon Sonuçları	44
4.4.4. Sistemin Matlab Simülasyon Sonuçları	46
5. SONUÇ.....	49
KAYNAKLAR	50
EKLER	52

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Paynter gösterimi.....	3
Şekil 2.2. Seri çok kapılılar	4
Şekil 2.3. Paralel çok kapılılar.....	4
Şekil 2.4. (a) Elektriksel transformatör.....	5
(b) Güç grafi	5
Şekil 2.5. (a) Elektriksel jirator.....	6
(b) Güç grafi	6
Şekil 2.6. Kozalitenin anlamı.....	7
Şekil 2.7. (a) 0-kapısı için kozalite şartları.....	7
(b) 1-kapısı için kozalite şartları.....	7
Şekil 2.8. (a) Transformatör için kozalite şartları.....	8
(b) Jirator için kozalite şartları.....	8
Şekil 2.9. Örnek elektrik devresi.....	10
Şekil 2.10. Örnek devrenin basitleştirilmiş bond graf modeli.....	11
Şekil 2.11. Örnek devrenin ilkel bond graf modeli.....	11
Şekil 2.12. Örnek devrenin güç grafi.....	12
Şekil 2.13. Örnek devrenin bond graf modeli.....	12
Şekil 2.14. Örnek Mekanik Sistem.....	14
Şekil 2.15. Örnek mekanik sistemin basitleştirilmiş bond graf modeli..	14
Şekil 2.16. Örnek mekanik sistemin güç grafi.....	15
Şekil 2.17. Örnek mekanik sistemin bond graf modeli.....	15
Şekil 2.18. Uzunluğu L olan boru.....	16
Şekil 2.19. L uzunluğundaki borunun bond graf modeli.....	17
Şekil 2.20. Örnek hidrolik sistem.....	18
Şekil 2.21. Örnek hidrolik sistemin basitleştirilmiş bond graf modeli....	18
Şekil 2.22. Örnek hidrolik sistemin güç grafi.....	19
Şekil 2.23. Örnek hidrolik sistemin bond graf modeli.....	20
Şekil 2.24. Örnek elektro-mekanik-pinomatik sistem.....	20
Şekil 2.25. Sistemin elektriksel kısmı.....	21

Şekil 2.26. Elektro-mekanik-pinomatik sistemin bond graf modeli.....	22
Şekil 2.27. Örnek devre.....	22
Şekil 2.28. Örnek devrenin bond graf modeli.....	23
Şekil 2.29. Elemanların çaba ve akış değişkenlerinin işaretlenmiş durumu.....	24
Şekil 4.1. Doğru akım motorunun kesiti.....	30
Şekil 4.2. Serbest uyarmalı doğru akım motorunun eşdeğer devresi.....	30
Şekil 4.3. ϕ akısının uyarma akımıyla değişimi.....	31
Şekil 4.4. Serbest uyarmalı doğru akım motorunun bond graf modeli....	33
Şekil 4.5. Serbest uyarmalı doğru akım motorunun endüvi akımı (F2) ve motor açısal hızının (F7) zamana göre değişiminin Enport simülasyonu grafiksel çıktısı.....	34
Şekil 4.6. Matlab simülasyonu için serbest uyarmalı doğru akım motorun blok diyagramı.....	35
Şekil 4.7. Serbest uyarmalı doğru akım motorunun endüvi akımı ve motor açısal hızının zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu grafiksel çıktısı.....	35
Şekil 4.8. Sistemin eşdeğer devresi.....	37
Şekil 4.9. Sistemin bond graf modeli.....	38
Şekil 4.10. Sistemin endüvi akımı (F2) ve açısal hızının (F7) zamana göre değişiminin Enport simülasyonu grafiksel çıktısı.....	39
Şekil 4.11. Matlab simülasyonu için sistemin blok diyagramı.....	40
Şekil 4.12. Sistemin endüvi akımı ve açısal hızının zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu grafiksel çıktısı.....	41
Şekil 4.13. Sistemin eşdeğer devresi.....	42
Şekil 4.14. Sistemin bond graf modeli.....	44
Şekil 4.15. Sistemin endüvi akımı $I_{a1}(t)$ ve açısal hızının zamana göre değişiminin Enport çıktısı.....	45
Şekil 4.16. Endüvi akımı $I_{a2}(t)$ ve sistem açısal hızının zamana göre değişiminin Enport çıktısı.....	45
Şekil 4.17. Matlab simülasyonu için sistemin blok diyagramı.....	46

Şekil 4.18. Sistemin endüvi akımı $I_{a1}(t)$ ve sistem açısal hızının
zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu

grafiksel çıktısı.....

47

Şekil 4.19. Sistemin endüvi akımı $I_{a2}(t)$ ve sistem açısal hızının
zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu

grafiksel çıktısı

48



TABLOLAR

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Bond graf bileşenleri ve matematiksel tanımları.....	9
Tablo 2.2. Kütle-endüktans benzeşimi	13



1.GİRİŞ

1.1 Sistem Modelleri

Sistem dinamiği çalışmalarında temel fikir sistemlerin modelini elde etmedir. Sistemlerin modelleri, davranışlarını önceden haber verecek, küçültülmüş ve basitleştirilmiş bir şekildedir

Bir sistemin, uygun kabuller yapılarak ve idealize edilmiş elemanlardan oluştuğu düşünülerek bir fiziksel modeli elde edilir. Temel fizik kanunları yardımıyla elemanların davranışlarını tanımlayan lineer veya nonlineer denklemler, yani matematiksel model elde edilir. Bu çalışmamızda kullanılan bond graf modeliyle sistemlerin matematiksel modeli elde edilebilir. Bunun yanısıra modele bakılarak sistemin yapısı hakkında da fikir edinilebilir.

1.2 Bond Graf Konusundaki Çalışmalar

Bond graf konusundaki ilk çalışma 1961 yılında yapıldı (Paynter,1961). “ Bond Graph ” olarak adlandırılan bu yöntemdeki ana düşünce güç aktarımı ve bu aktarımın graflar yardımıyla gösterilmesidir (Blundell, 1982; Karnoop, 1990). Bond graf ismi “Bağlaç Diyagramları” şeklinde tercüme edilmiştir (Şen, 1973). Bağlaç diyagramları esasında C.E. Shannon (1942) ve S.J. Mason (1953) tarafından bulunmuş olan işaret akış diyagramları tekniğinden esinlenerek düşünülmüş bir lineer graf tekniğidir (Şen, 1977).

1.3 Bond Graf Modelinin Sağladığı Yararlar

Bond graf modeli özellikle karmaşık yapıdaki sistemlerin analizinde büyük kolaylık sağlar. Karmaşık yapıya sahip bir sistem kendisini oluşturan fiziksel

bileşenlerin enerji domenleri ne olursa olsun aralarındaki enerji kapıları yardımıyla birleştirilerek modellenebilir (Şen, 1977; Poyraz v.d., 2000).

Herhangi bir fiziksel sistemin bileşenleri arasındaki güç alışverişini gösteren enerji kapılarının kurdukları operasyonel diyagrama doğrudan doğruya bakarak sistemin iç ve uç değişkenleri cinsinden bir takım matris vektör bağıntıları kurulabilir (Poyraz, 1981). Bu bağıntılar istenilen bir matematik modeli verecek biçimlerde bond graf modelini elde edebileceği gibi bazı sistem fonksiyonlarının elde edilmesinde de kullanılabilir.

Ayrıca her bir bond bileşeni ilgili olduğu fiziksel bileşenin iç ve uç değişkenini gösterdiğinden, n tane bond bileşeni olan bir bond modeli $2n$ tane akış bileşeni olan bir işaret akış diyagramına dönüştürülebilir.



2.BOND GRAF TEKNIĞİ

2.1. Bond Graf'ın Tanımı

Bir bond en ilkel biçimde Şekil 2.1'de görüldüğü gibi a ve b gibi iki alt sistem ya da iki enerji kapısı arasında a'yı b'ye bağlayan bir çizgi ile gösterilir. Bu gösterim a'dan b'ye veya b'den a'ya bir P ($P=e.f$) gücünün aktarıldığı anlamına gelir (Paynter, 1961; Rosenberg, 1983; Karnoop, 1990). Bu gösterimde e'ye çaba değişkeni, f'ye ise akış değişkeni adı verilir. Ok yönü gücün yönünü gösterir ve bu yön akış ve çaba değişkenlerinden bağımsızdır.



Şekil 2.1. Paynter gösterimi

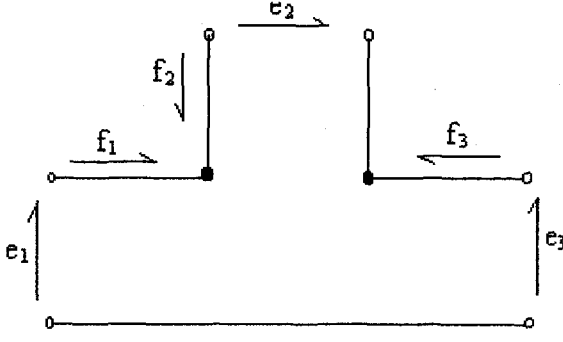
2.2. Enerji Kapıları

Bir sistemin bond graf modelini oluşturabilmek için o sistemin bütün enerji kapıları belirlenir. Dokuz tane enerji kapısı mevcuttur. Bunlar 0, 1, S_e , S_f , R, I, C, TR, GY dir. S_e , S_f , R, I, C enerji üreten veya tüketen elemanlardır. S_e çaba kaynağını, S_f akış kaynağını, R direnci, I endüktansı, C de kapasitansı temsil eder. 0-kapısı paralel çok kapılı, 1-kapısı ise seri çok kapılı olarak tanımlanır.

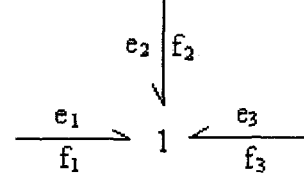
1-kapısında tek bir akış değişkeni mevcuttur ve bondlardaki çaba değişkenlerinin toplamı sıfıra eşittir (Şekil 2.2). Bunun matematiksel ifadesi;

$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \quad (2.1)$$

$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \quad (2.2)$$



(a) Fiziksel bağlantı



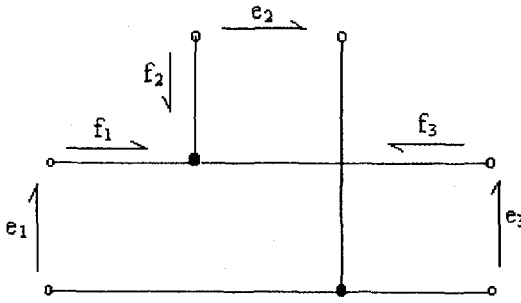
(b) Bond modeli

Şekil 2.2. Seri çok kapılılar

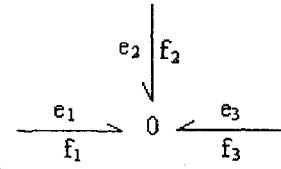
Genel bir tanımlama yaparsak n tane bondun bağlı olduğu 1- kapısında;

$$\sum_{i=1}^n e_i(t) = 0 \quad (2.3)$$

$$f_1(t) = f_2(t) = \dots = f_n(t) \quad (2.4)$$



(a) Fiziksel bağlantı



(b) Bond modeli

Şekil 2.3. Paralel çok kapılılar

Benzer şekilde 0- kapısında ise ortak bir çaba değişkeni mevcuttur ve bondlardaki akış değişkenlerinin toplamı sıfıra eşittir (Şekil 2.3). Bunun matematiksel ifadesi ise;

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (2.5)$$

$$f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) = 0 \quad (2.6)$$

n tane bondun bağlı olduğu 0-kapısı için;

$$\sum_{i=1}^n f_i(t) = 0 \quad (2.7)$$

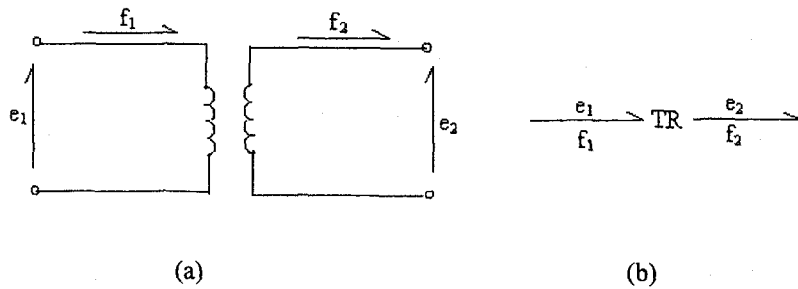
$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) = \dots = e_n(t) \quad (2.8)$$

Karmaşık yapıli sistemlerde birden fazla enerji modu bulunduğunda aynı şekilde birden çok enerji dönüşümü var olabilir. Bu tür sistemlerde bir enerji modundan diğeri enerji moduna enerji aktarımı vardır. Enerji aktarımında sistem değişkenleri belli bir oranda aynı değişkenlere dönüşüyorsa böyle bir fiziksel aktarım elemanına “fiziksel transformatör” denir ve bond graf elemanı olarak -TR- ile gösterilir. Elektriksel transformatörün tanım bağıntıları;

$$e_1(t) = m.e_2(t) \quad (2.9)$$

$$m.f_1(t) = f_2(t) \quad (2.10)$$

burada m dönüştürme oranıdır. Elektriksel transformatörün sembolü ve güç grafi Şekil 2.4’de görülmektedir.



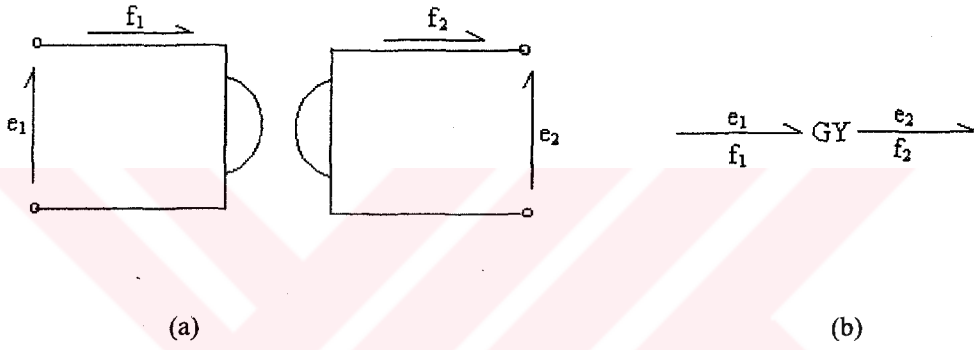
Şekil 2.4. (a) Elektriksel transformatör (b) Güç grafi

Sistem değişkenlerinin bir enerji modundan diğer bir enerji moduna aktarılışı sırasında çaba değişkeni ile akış değişkeni arasında çaprazlama bir değişim oluyorsa, bu tip sistem elemanına “fiziksel jirator” adı verilir ve $-GY-$ ile gösterilir. Elektriksel jiratorün tanım bağıntıları;

$$e_1 = r.f_2 \quad (2.11)$$

$$e_2 = r.f_1 \quad (2.12)$$

burada r dönüştürme katsayısıdır. Elektriksel transformatörün sembolü ve güç grafi Şekil 2.5’de görülmektedir.



Şekil 2.5. (a) Elektriksel jirator (b) Güç grafi

2.3. Kozalite (Nedensellik)

Şekil 2.1’deki gösterim a’dan b’ye veya b’den a’ya bir gücün aktarımının olduğunu temsil eden bir güç grafidir. Bu güç grafini temsil ettiği sistemin özelliklerini yansıtan ve analizine yönelten bond grafa çeviren yeni bir özellik eklemek gerekir ve bunada kozalite (nedensellik) denir.

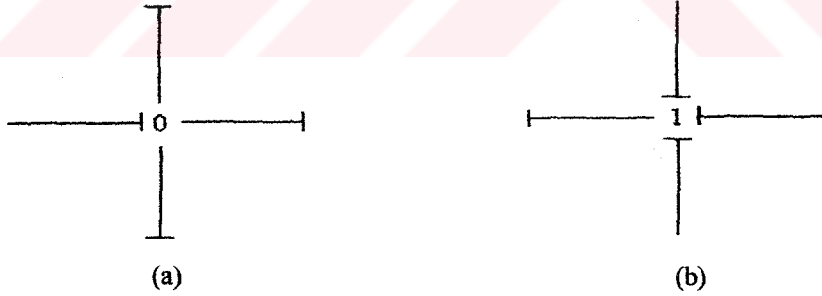
Sebeup sonuç ilişkisinin graf üzerinde gösterilmesiyle grafın bir yerindeki herhangi bir nicelliğin, grafın başka bir yerindeki nicelliği etkilediği sonucunu çıkarmak mümkündür. Böylece sebepten sonuca doğru bir nedensellik yolu izlemek mümkündür. (Blundell, 1982)

Kozalite dediğimiz olay bir bondun sonuna kısa bir çizgi (bar) eklenerek gösterilir. Gerilim kozalitesi bara doğru, akım kozalitesi ise bardan dışarıya doğrudur. Şekil 2.6 bu durumu göstermektedir. Bu koşul sonucu akım ve gerilim kozaliteleri bir bond üzerinde daima ters yöndedirler.



Şekil 2.6. Kozalitenin anlamı

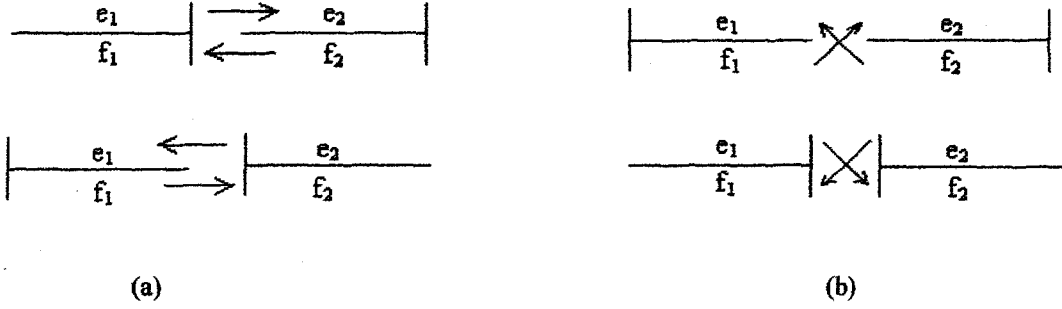
Bondlardaki kozalite, kesin kuralları izlemek zorundadır. Bağlantılar, sadece bir bond tarafından tespit edilen değişkene sahip olmalıdır. Yani bir gerilim bağlantısı (0-kapısı), sadece bir bara (değişkeni belirleyen bondun barına) sahip olmalıdır. Bir akım bağlantısı (1-kapısı), tek bir bond (değişkeni belirleyen bond) hariç diğer bondların barlarıyla çevrelenmelidir. Bu son iki koşul Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. (a) 0-kapısı (b) 1-kapısı için kozalite şartları

Birer enerji aktarıcı olan transformatör ve jirator için de kozaliteler belli kurallara sahiptirler. Transformatör kozaliteyi, yönde hiçbir değişiklik yapmadan iletir. Jirator ise kozalitenin yönünü değiştirir. Yani jiratoré giren bir gerilim kozalitesi akım

kozalitesi olarak çıkacaktır. Transformatör ve jirator için kozalite şartları Şekil 2.8 (a) ve Şekil 2.8 (b)'de verilmiştir.



Şekil 2.8 (a) Transformör (b) Jirator için kozalite şartları

Sonuç olarak, bir elektrik devresinin bond graf modeli kozalitelenilirken ilk önce enerji yayan veya depolayan elemanları göz önüne almak gerekir (Yıldırım, 1993). Dirençlerin kozalite seçimi serbesttir ve bağlı bulundukları enerji kapılarındaki diğer elemanlara göre kozalitelenilir. Genellikle 0- ve 1- kapılarındaki kozaliteler “durum denklemleri” biçiminde bir matematik model elde edilmesini sağlayacak şekilde seçilir.

Tablo 2.1.'de tek kapılı, iki kapılı ve üç kapılı bağlaç bileşenleri (enerji kapıları), kozaliteleri ve matematiksel tanımları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 2.1 Bond Graf bileşenleri ve Matematiksel Tanımları

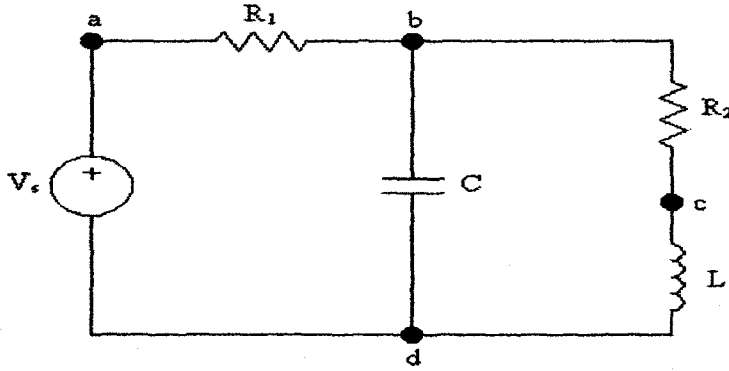
Bileşen	Bond Graf Gösterimi	Kozalitelerlendirilmiş Gösterim	Matematik tanımları
Güç Grafi	$\frac{e}{f}$		$P = e \cdot f$
Kaynak	$\begin{array}{c} \xrightarrow{S_E} \\ \xleftarrow{S_F} \end{array}$	$\begin{array}{c} \xrightarrow{S_E} \\ \xleftarrow{S_F} \end{array}$	$e(t) = S_E(t)$ $f(t) = S_F(t)$
Direnç	$R \xleftarrow{\quad}$	$R \xleftarrow{\quad}$ $R \xleftarrow{\quad}$	$e(t) = R \cdot f(t)$ $f(t) = G \cdot e(t)$
Kapasite	$C \xleftarrow{\quad}$	$C \xleftarrow{\quad}$ $C \xleftarrow{\quad}$	$e(t) = \frac{1}{C} \int f(t) dt$ $f(t) = C \frac{de(t)}{dt}$
İndüktans	$L \xleftarrow{\quad}$	$L \xleftarrow{\quad}$ $L \xleftarrow{\quad}$	$f(t) = \frac{1}{L} \int e(t) dt$ $e(t) = L \frac{df(t)}{dt}$
Transformatör	$\begin{array}{c} e_1 \xrightarrow{f_1} \text{TF}^{(m)} \xrightarrow{e_2} f_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} e_1 \xrightarrow{f_1} \text{TF}^{(m)} \xrightarrow{e_2} f_2 \\ e_1 \xrightarrow{f_1} \text{TF}^{(m)} \xrightarrow{e_2} f_2 \end{array}$	$\begin{bmatrix} e_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & m \\ m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} f_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m} \\ \frac{1}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$
Jirator	$\begin{array}{c} e_1 \xrightarrow{f_1} \text{GY}^{(r)} \xrightarrow{e_2} f_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} e_1 \xrightarrow{f_1} \text{GY}^{(r)} \xrightarrow{e_2} f_2 \\ e_1 \xrightarrow{f_1} \text{GY}^{(r)} \xrightarrow{e_2} f_2 \end{array}$	$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r \\ r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{r} \\ \frac{1}{r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$
0-Kapısı	$\begin{array}{c} e_1 \xrightarrow{f_1} 0 \xleftarrow{e_2} f_2 \\ e_3 \uparrow f_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} e_1 \xrightarrow{f_1} 0 \xleftarrow{e_2} f_2 \\ e_3 \uparrow f_3 \end{array}$	$e_1 = e_2 = e_3$ $f_1 + f_2 + f_3 = 0$ $f_1 = -(f_2 + f_3)$
1-Kapısı	$\begin{array}{c} e_1 \xrightarrow{f_1} 1 \xleftarrow{e_2} f_2 \\ e_3 \uparrow f_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} e_1 \xrightarrow{f_1} 1 \xleftarrow{e_2} f_2 \\ e_3 \uparrow f_3 \end{array}$	$f_1 = f_2 = f_3$ $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ $e_1 = -(e_2 + e_3)$

2.4. Fiziksel Sistemlerin Bond Graf Modelinin Elde Edilişi

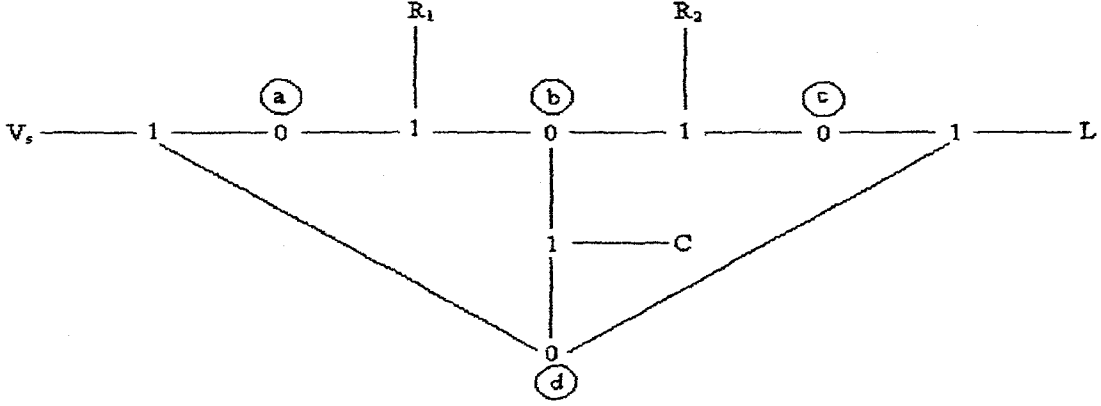
Burada sırasıyla birer dinamik sistem olan elektrik, mekanik ve hidrolik sistemlerin devre şemasından yola çıkılarak bond graf modelinin nasıl elde edileceği üzerinde durulmuştur.

2.4.1. Elektrik Devrelerinin Bond Modelinin Elde edilişi

Bir elektrik devresinin bond grafını elde edebilmek için önce devrede farklı potansiyeldeki düğümler için 0-kapısı yerleştirilir. 0-kapılarının arasına 1-kapıları konur ve bu kapılara düğümler arasındaki elemanlara (C , I , R , S_e , S_f) karşılık gelen bondlar bağlanır. Daha sonra devreye ilişkin bir referans düğüm (sıfır potansiyel) belirlenir. Elektrik devrelerinin bond graf modeli elde edilirken bu referans düğüm uygun 0-kapılarından herhangi biri arasından seçilir. Şekil 2.9'daki örnek devrede "d" düğümünü referans olarak alınmıştır. Belirtilen işlemler adım adım uygulandıktan sonra örnek elektrik devresinin Şekil 2.10'da verilen basitleştirilmiş bond graf modeli elde edilmiş olur (Yıldırım, 1993).

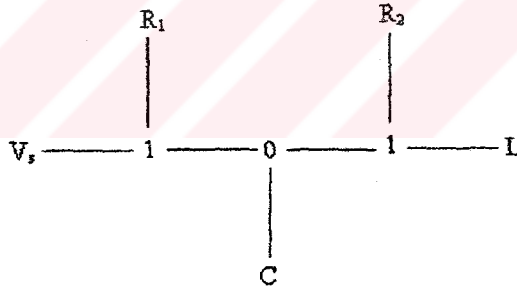


Şekil 2.9. Örnek elektrik devresi



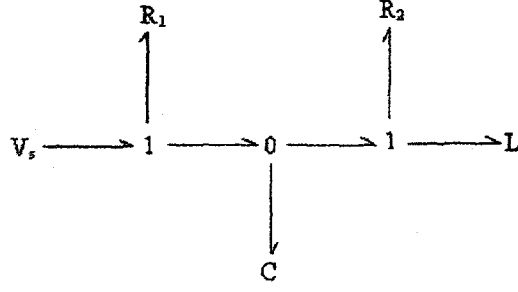
Şekil 2.10. Örnek devrenin basitleştirilmiş bond graf modeli

Daha sonra elde edilen bu örnek devrenin basitleştirilmiş bond graf modeli üzerinde; referans olarak kabul edilen sıfır potansiyeli ("d" düğümü) ile üzerinde başka eleman bulundurmeyen 1- ve 0- kapıları diyagramdan çıkartılırsa devrenin Şekil 2.11'de verilen ilkel bond graf modeli elde edilmiş olur.



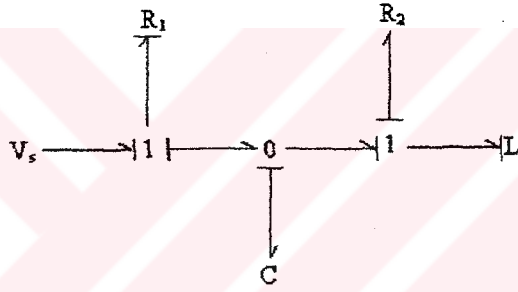
Şekil 2.11. Örnek devrenin ilkel bond graf modeli

Bu ilkel bond graf modelinden güç grafına geçmek için bağlaç çizgileri yarım oklar şekline dönüştürülür. Kaynakların yarım oklarının yönü bağlı bulundukları 0- ve 1- kapılarına doğru, pasif bileşenlerin (R, L, C) yarım oklarının yönleri ise 1- ve 0- kapılarından bu bileşenlere doğru seçilerek güç grafi elde edilir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Örnek devrenin güç grafi

Son olarak güç grafi Tablo 2.1.'e ve kozalite bölümündeki açıklamalara uygun olarak kozalitelerilendirilerek devrenin bond graf modeli elde edilmiş olur (Şekil 2.13)



Şekil 2.13 Örnek devrenin bond graf modeli

Tablo 2.2.'de farklı enerji modundaki fiziksel sistemler (elektrik, mekanik, hidrolik) arasındaki ilişkiyi gösteren kütle endüktans benzetimi verilmiştir.

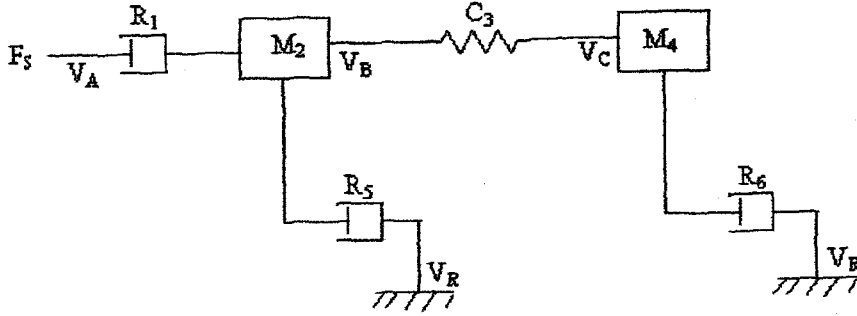
Tablo 2.2 Kütle-Endüktans Benzetimi

Mekanik sistemler		Elektrik Sistemler	Hidrolik Sistemler	Genel
Öteleme Hareketi	Dönme Hareketi			
kuvvet F	dönme momenti M	gerilim V	Basınç P	Uç değişkeni e
hız V	açısal hız ω	akım i	Debi Q	İç değişkeni f
kütle m	Eylemsizlik momenti I	indüktans L	İnertans L _h	
yay 1/K	döner yay 1/K	kapasitans C	Hacim V	

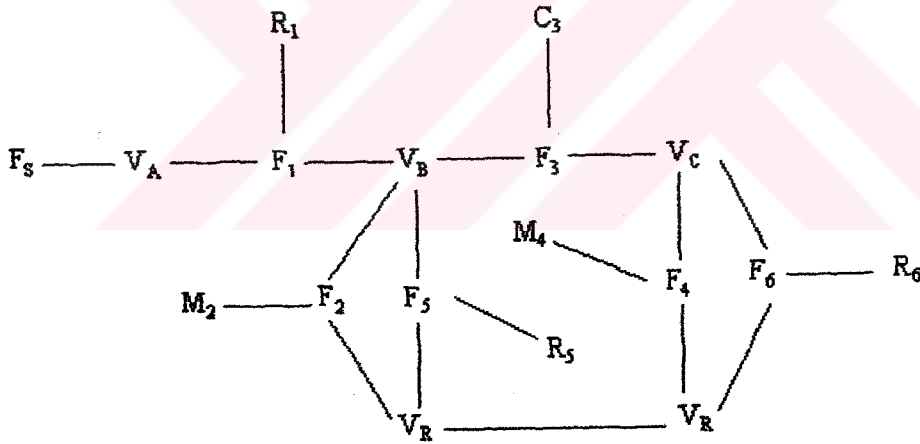
2.4.2 Mekanik sistemlerin Bond Graf Modelinin Elde edilişi

Mekanik bir sistemin bond grafını elde edebilmek için elektriksel bir sistemden farklı olarak ilk önce farklı hızlar için 1-kapısı yerleştirilir. C, I, R, S_e, S_f'ye karşılık gelen her bond için 1-kapıları arasına 0-kapısı yerleştirilir ve bondlar bu kapılara bağlanır. Daha sonra sisteme ilişkin bir referans düğüm belirlenir. Yine burda elektriksel bir sistemden farklı olarak belirlenecek referans düğüm bir 0-kapısı değilde bir 1-kapısı olmalıdır. Şekil 2.14.'deki örnek sistemde tercih edilen bu referans 1-kapısı "V_R" yer hızıdır. Bu belirtilen işlemler sırasıyla yapıldıktan sonra örnek mekanik sistemin Şekil 2.15'de verilen basitleştirilmiş bond graf modeli elde edilmiş olur (Rosenberg, 1983). Alınan örnek sistemde Tablo 2.1'den de görüleceği gibi kuvvet (F_s) uç değişkenine(e), hız (V_A, V_B, V_C, V_R) iç değişkenine (f) karşılık gelir. Diğer

parametreler olan yay (C_3), mekanik sürtünme (R_1, R_5, R_6) ve kütle (M_2, M_4) ise sırasıyla kapasitör (C), direnç (R) ve indüktansa (I) karşılık gelirler.



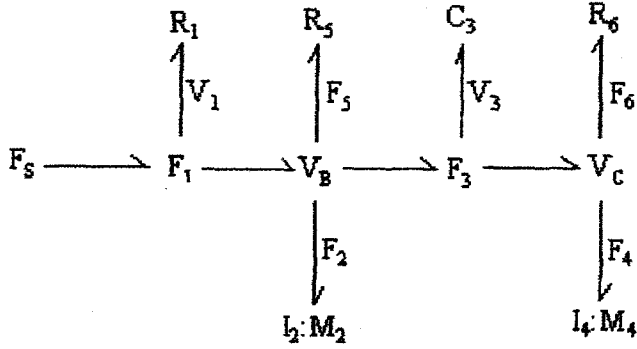
Şekil 2.14. Örnek mekanik sistem



Şekil 2.15. Örnek mekanik sistemin basitleştirilmiş bond graf modeli

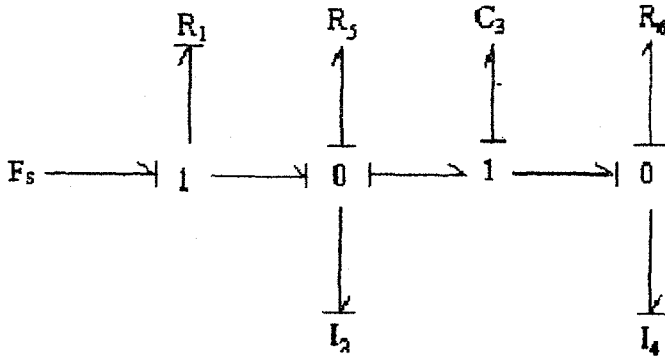
Elde edilmiş olan örnek sistemin basitleştirilmiş bond graf modeli üzerinde; referans olarak kabul edilen V_R düğümü ile üzerinde başka eleman bulundurmeyen 1- ve 0-kapıları diyagramdan çıkartılırsa ve kaynakların yarım oklarının yönü bağlı

bulundukları kapılara doğru, pasif bileşenlerin (R , I , C) yarım oklarının yönü ise bulundukları kapılardan bu bileşenlere doğru seçilerek örnek sistemin şekil 2.16'da verilen güç grafi elde edilir.



Şekil 2.16. Örnek mekanik sistemin güç grafi

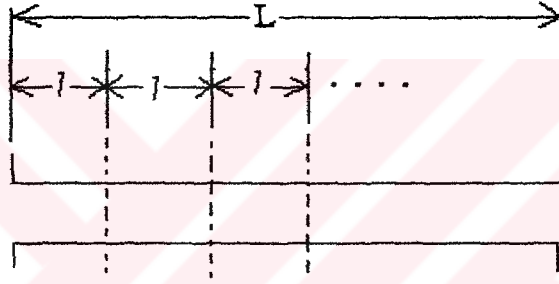
En son aşama olarak güç grafi, kozalite bölümündeki açıklamalara ve Tablo 2.1'e uygun olarak kozalitelerendirilerek örnek mekanik sistemin bond graf modeli Şekil 2.17'de olduğu gibi elde edilmiş olur.



Şekil 2.17. Örnek mekanik sistemin bond graf modeli

2.4.3 Hidrolik Sistemlerin Bond Graf Modelinin Elde Edilişi

Hidrolik bir sistemin bond graf modeli elde edilirken bir elektrik devresinin bond graf modelinin elde edilmesinde izlenen adımlara benzer bir yol izlenir. Bu izlenecek adımlara geçmeden önce hidrolik sistemlerde sıkça kullanılan ve içersinden gaz veya sıvıların geçtiği uzun boruların bond graf karşılığı bilmek gerekir. Bu karşılığı inceleyebilmek için şekil 2.18’de L uzunluğunda bir boru verilmiştir. Bu borunun L uzunluğu n tane l uzunluğuna bölünmüştür. Her l uzunluğundaki borunun bir kompliyansı (C), bir inertansı (I) ve bir direnci (R) bulunmaktadır (Rosenberg, 1983).



Şekil 2.18. Uzunluğu L olan bir boru

Kompliyans (C), inertans (I) ve direncin (R) matematiksel ifadeleri sırasıyla

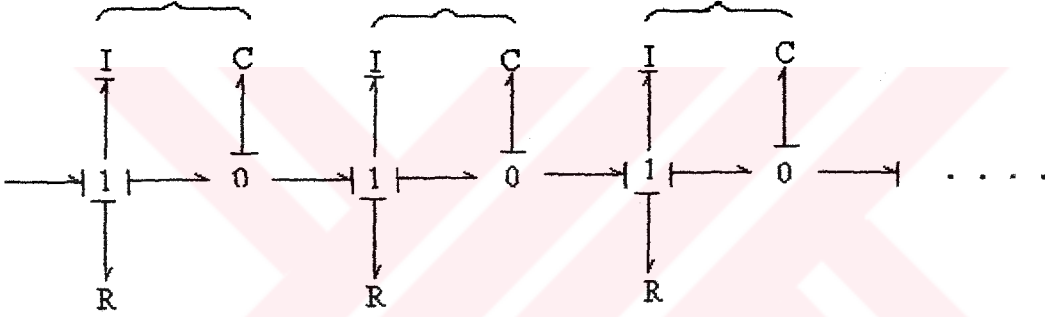
$$C = V_o \left(\frac{1}{B} + \frac{2r_o}{Et_w} \right) \quad (2.13)$$

$$I = \rho \frac{l}{A} \quad (2.14)$$

$$R = \frac{128\mu l}{\pi d^4} \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir. (2.13) ifadesindeki V_o uzunluğu l olan borunun iç hacmi, r_o borunun iç yarıçapı, E borunun yapıldığı maddenin elastik modülü, t_w borunun duvar kalınlığı, B ise boru içersinden geçen akışkanın bulk moduludur. (2.14) ifadesinde ρ

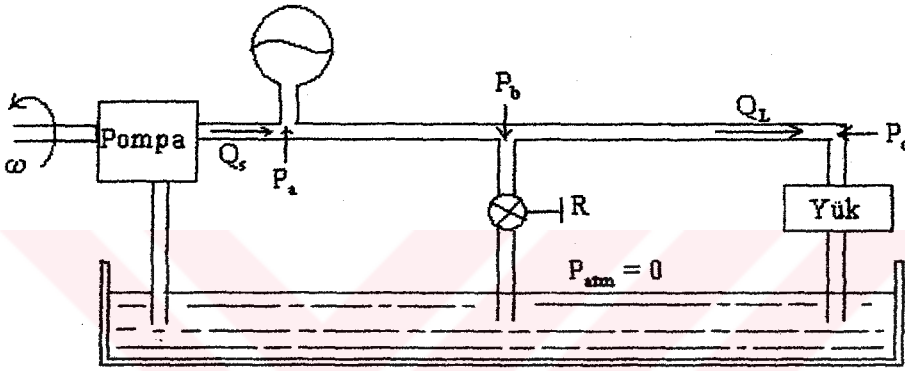
boru içersinden geçen akışkanın yoğunluğu, l borunun uzunluğu, A ise boru kesitinin iç alanıdır. (2.15) ifadesinde ise μ viskozite, d borunun iç çapı, l boru uzunluğudur. Yine (2.13), (2.14) ve (2.15) ifadelerinden anlaşılacağı üzere kompliyans, inertans ve direnç değerleri borunun yapıldığı madenin cinsine, ebatlarına ve boru içersinden geçen akışkanın cinsine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.19'da n tane l uzunluğunda borulardan oluşan L uzunluğundaki borunun bond graf modeli verilmiştir. Yalnız şunu belirtmek gerekir ki l uzunluğundaki bir borunun kompliyans, inertans ve direnç değerleri çeşitli parametrelere bağlı olduklarından, bağlı oldukları parametre değerlerine göre biri, ikisi, hata üçüde ihmal edilebilir. Dolayısıyla bond graf modelide buna göre değişir.



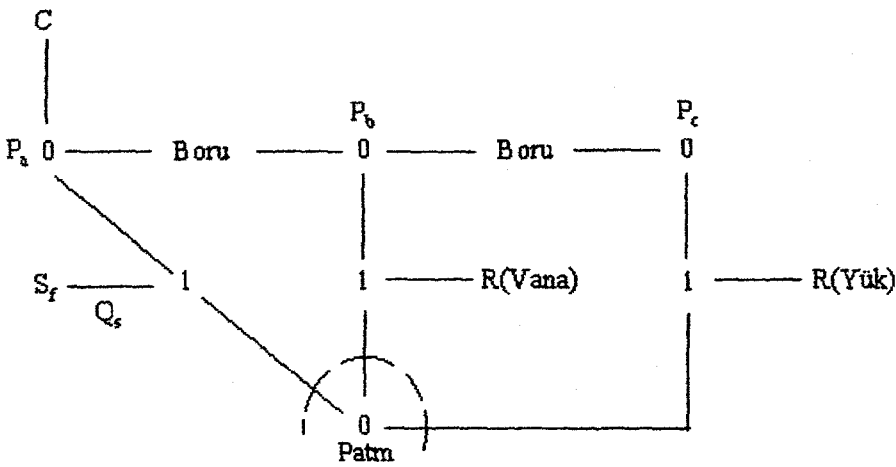
Şekil 2.19. L uzunluğundaki borunun bond graf modeli

Daha öncede değinildiği gibi hidrolik bir sistemin bond graf modeli elde edilirken elektrik devresinin bond graf modeli elde edilirken izlenen adımlara benzer bir yol izlenir. Yalnız burda iki sistem arasında belirtilmesi gereken bir istisnayı durum vardır. Bilindiği gibi bir elektrik devresindeki kapasitör gerilim farkını etkiler. Oysa bir hidrolik sistemdeki bir çok akışkan kapasitörü (akışkan toplayıcı) basınç farkını etkilemez. Bu yüzden hidrolik bir sistemin bond graf modeli oluşturulurken bu istisnayı durumu göz önünde bulundurmak gerekir. Önce her farklı basınç için bir 0-kapısı belirlenir. Belirlenen 0-kapılarının arasına 1-kapıları veya borular için boru diye adlandırdığımız kapılar konur. 0-kapıları arasına konan 1-kapılarına bu kapılara

bağlanması gereken elemanlara (C , I , R , S_e , S_f) karşılık gelen bondlar bağlanır. Ayrıca akışkan kapasitörü daha önceden farklı basınçlar için belirlenen 0-kapılarından ait olduğu 0-kapısına bağlanır. Daha sonra sisteme ilişkin bir referans düğüm belirlenir. Belirlenen bu referans düğüm atmosfer basınç değerini alan düğümdür. Pompa yardımıyla yüke aktarılan gücü bir vana ile kontrol eden Şekil 2.20'deki örnek hidrolik sisteme belirtilen işlemler adım adım uygulandıktan sonra sistemin Şekil 2.21'de verilen basitleştirilmiş bond graf modeli elde edilmiş olur.

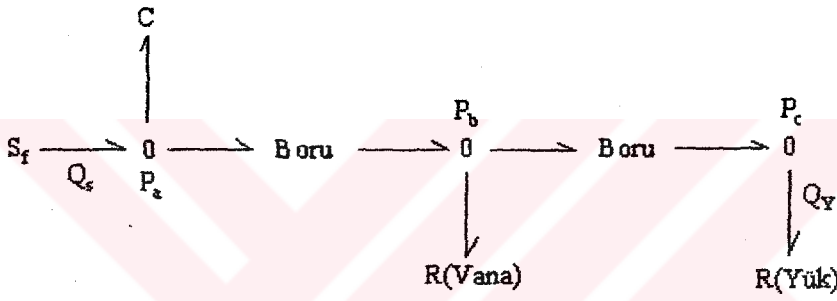


Şekil 2.20. Örnek hidrolik sistem



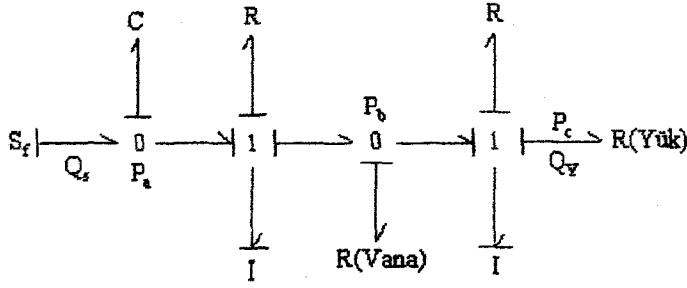
Şekil 2.21. Örnek hidrolik sistemin basitleştirilmiş bond graf modeli

Elde edilen örnek sistemin basitleştirilmiş bond graf modelinden referans olarak alınan atmosfer basıncı ile üzerinde başka eleman bulundurmayan 1- ve 0-kapıları diyagramdan çıkartılırsa ve bağlaç çizgileri yarım oklar şekline dönüştürülürse Şekil 2.22’de verilen devrenin güç grafi elde edilmiş olur. Bağlaç çizgilerinin yönü belirlenirken kaynakların yarım oklarının yönü bağlı bulundukları 0- ve 1-kapılarına doğru, pasif bileşenlerinin (R, I, C) yarım oklarının yönleri ise 1- ve 0-kapılarından bu bileşenlere doğru seçilir.



Şekil 2.22. Örnek hidrolik sistemin güç grafi

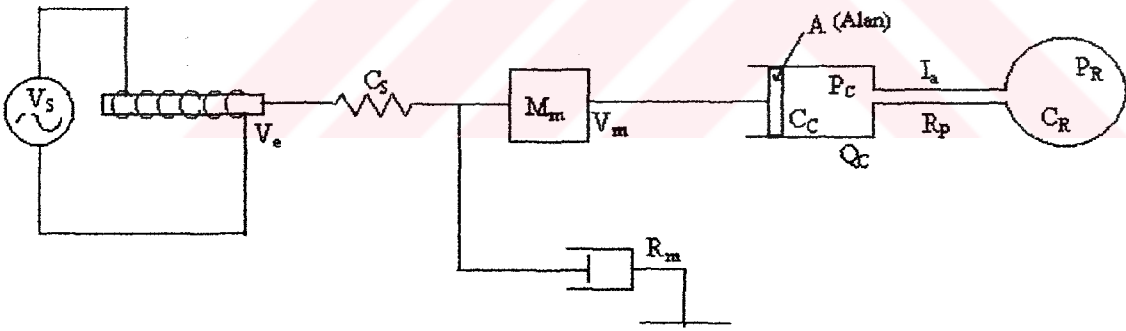
Sistemin güç grafi elde edildikten sonra boru olarak adlandırılan kapılara karşılık gelen bondlar (R, I) yerine yerleştirilir. Bu örnek sistemde kompliyan (C) ihmal edilmiştir. Son aşamada Tablo 2.1’e ve diğer açıklamara uygun olarak kozalitlendirilerek Şekil 2.23’de verilen bond graf modeli elde edilmiş olur.



Şekil 2.23. Örnek hidrolik sistemin bond graf modeli

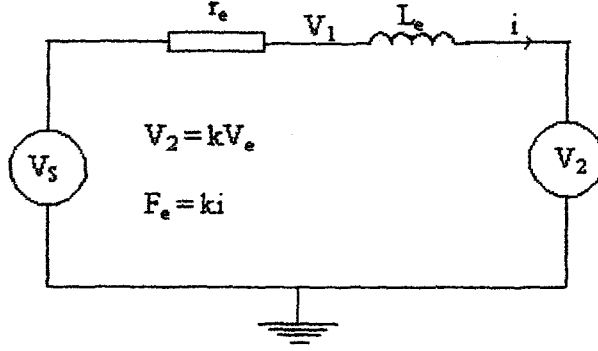
2.4.4. Karmaşık Bir Sistemin Bond Graf Modelinin Elde Edilişi

Burada elektrik, mekanik ve hidrolik gibi üç farklı enerji modunu içeren kompleks bir sistemin bond graf modeli verilecektir. Şekil 2.24.'de ele alınan örnek sistem, elektro mıknatısa bir yay ile bağlı kütlesi M_m ve sürtünme direnci R_m olan olan pinomatik bir pompadan oluşmaktadır. Pompa sürtünme direnci R_p ve inertansı I_a olan



Şekil 2.24. Örnek elektro-mekanik-pinomatik sistem

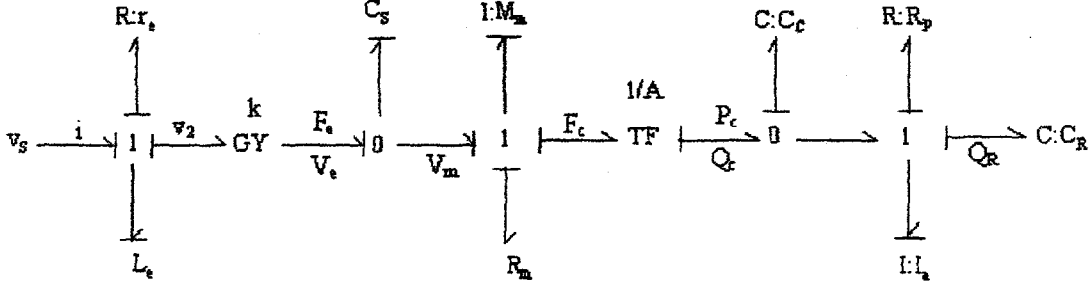
bir boru yardımıyla hazneye hava basmaktadır. Sistemin elektriksel kısmını oluşturan elektro mıknatısın eşdeğer devresi Şekil 2.25'de verilmiştir. Devre üzerinde gösterilen v_1 , v_2 , v_3 gerilimi gösterirken V_e hızı F_e de kuvveti gösterir.



Şekil 2.25. Sistemin elektriksel kısmı

Elektriksel kısım üzerinde gösterilen iki denklemden anlaşılacağı üzere elektriksel formdan mekanik forma bir enerji dönüşümü söz konusudur. Bu dönüşümde çaba değişkeni (v_2) akış değişkenine (V_e), akış değişkeni (i) çaba değişkenine dönüşmüştür. Bu dönüşüm özelliğinden de anlaşılacağı üzere sistemin bond graf modeli oluşturulurken elektrik ve mekanik form arasındaki dönüştürücünün bir jirator (GY) enerji kapısı olması gerekir. Benzer biçimde Şekil 2.24'de bakıldığında pompaya gelen kuvvetin (F_e) pompa silindiri içinde bir basınç (P_e) oluşturduğu görülür. Kuvvet ve basınç bond graf diyagramında çaba değişkenleridir. Dolayısıyla burada çaba değişkeni çaba değişkenine dönüşmüştür. Buda bize gösterir ki sistemin bond graf modeli oluşturulurken, mekanik ve hidrolik form arasındaki dönüşümde bir transformatör (TF) kullanılması gerekir.

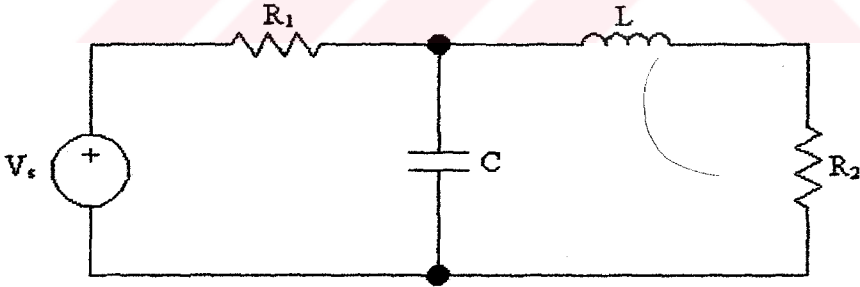
Karmaşık bir sistemin bond graf modeli oluşturulurken sistemi oluşturan her enerji formunun teorik bilgisini iyi bilmek gerekir. Ayrıca sistemin farklı enerji formları arasındaki ilişkiyi de iyi bilmek lazım. Bunlar biliniyorsa, bond graf modelinin oluşturulmasında ilk yapılması gereken iş enerji dönüştürücü kapılarının (TF, GY) belirlenmesidir. Örnek sistemimiz için bunlar belirlendi. Daha sonra önceki bölümlerde elektrik, mekanik, hidrolik sistemlerin bond graf modeli elde edilirken izlenen yola benzer bir yol izlenerek Şekil 2.26'da verilen sistemin bond graf modeli elde edilmiş olur.



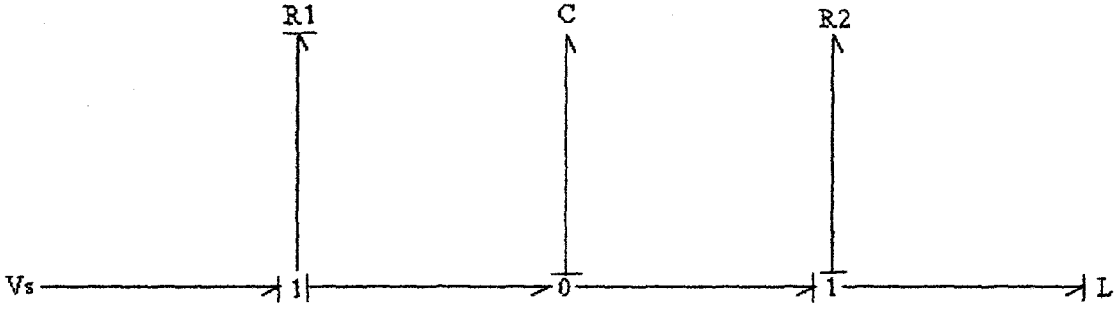
Şekil 2.26. Elektro-mekanik-pinomatik sistemin bond graf modeli

2.5. Bond Graf Modelinden Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

Bond graf modeli elde edilmiş bir sistemin durum denklemleri sistematik bir yol izlenerek çıkartılır. Şekil 2.27’de verilen örnek elektrisel devreye ait Şekil 4.28’deki bond graf modelini kullanarak örnek devrenin durum denklemlerinin çıkartılmasını adım adım inceleyelim.



Şekil 2.27. Örnek devre



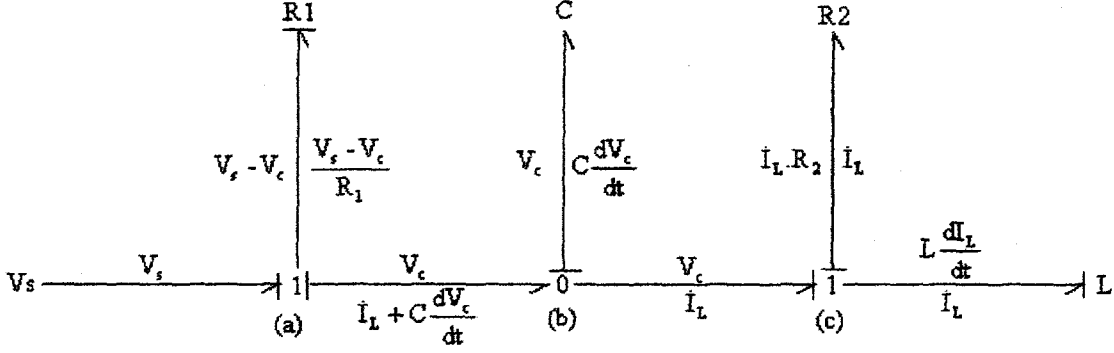
Şekil 2.28. Örnek devrenin bond graf modeli

Daha önce belirtildiği üzere 0- kapısına ilişkin ortak değişken düğüm gerilimi, 1- kapısındaki elemanlara ilişkin ortak değişken çevre akımıdır. 1 ve 0-kapılarındaki ortak değişkenleri, bu kapılara bağlı durum değişkenleri olabilecek endüktans akımı ve kapasite gerilimi cinsinden ifade edebiliriz. Durum değişkenlerinin doğrudan bağlı olmadığı 1 ve 0-kapıları için de durum değişkenleri veya onların türevleri cinsinden ifade edilmiş ortak değişkenler kullanılabilir. Geriye kalan elemanların akım veya gerilimleri, durum değişkenleri, bunların türevleri, kaynaklar yada sabitler cinsinden yazılır. Bu işlemler yapılırken;

$$V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.16)$$

$$i_C(t) = C \frac{dV_C}{dt} \quad (2.17)$$

tanım bağıntıları ile diğer elemanlara ilişkin temel tanım bağıntıları kullanılır. Böylece hiçbir bond üzerinde bağımlı değişken kalmamış olur. Bu işlemleri örnek devrenin bond grafi üzerinde gösterirsek, bond graf elemanlarının çaba ve akış değişkenlerinin durumu Şekil 2.29'daki gibi olur.



Şekil 2.29. Elemanların çaba ve akış değişkenlerinin işaretlenmiş durumu

Şekil 2.29'da (a), (b) ve (c) ile gösterilen kapıların ortak değişkenleri sırayla $(V_s - V_c)/R_1$, V_c ve I_L şeklinde olur. Burada I_L akımı ve V_c gerilimi devrenin durum değişkenlerini oluşturmaktadır. Ayrıca $I_{R1} = (V_s - V_c)/R_1$ de durum değişkeni cinsinden ifade edilmiştir. Buna göre (a) kapısı için uygunluk denklemini yazarsak;

$$V_s - V_c - R_1 \left(I_L + C \frac{dV_c}{dt} \right) = 0 \quad (2.18)$$

şeklinde olur. (2.15) denklemini düzenlersek,

$$\frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{CR_1} - \frac{1}{C} I_L + \frac{1}{CR_1} V_s \quad (2.19)$$

ifadesi elde edilmiş olur. (c) kapısı için de benzer işlemleri yapacak olursak,

$$V_c - L \frac{dI_L}{dt} - R_2 I_L = 0 \quad (2.20)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemde düzenlenirse,

$$\frac{d\dot{I}_L}{dt} = \frac{V_C}{L} - \frac{R_2}{L} \dot{I}_L \quad (2.21)$$

denklemine ulaşılır.

Burada elde edilen (2.19) ve (2.21) denklemleri örnek devrenin durum denklemleridir.

2.6. Bond Graf Modeli İle Simülasyon Yöntemleri

Bond graf modellerinde simülasyon yapabilmek amacıyla değişik simülasyon dilleri mevcuttur. Bunlar ENPORT, BONDSO, TUTSIM VE ACSL'dir (Granada,1985; Demir v.d., 1997). Bu programların bir kısmı bond graf modelinden belirli bir analitik yapı (denklem takımı) oluşturulduktan sonra data kabul eder. Diğer bir kısmı da ya doğrudan bond graf modelinin tanımına gerek duyar veya blok diyagramı esasına dayanır. Enport ve Tutsim hem bond graf modelini hem de blok diyagramını simülasyon için esas alır. Bu çalışmada Enport simülasyonu üzerinde durulmuştur.

3. ENPORT SİMÜLASYONU PROGRAMI

3.1. Genel Bilgi

Bond graf modeli elde edilmiş bir sistemi simüle etmek için çeşitli paket programlar mevcuttur. ENPORT' da bunlar arasında yer alır ve yaygın olarak kullanılır(Rosenberg, 1974).

ENPORT blok diyagram veya bond graf modelini esas alarak simülasyon yapan bir paket programdır. Bond grafla ilk simülasyon IBM bilgisayarları üzerinde Enport programı kullanılarak yapılmıştır (Karnopp ve Rosenberg, 1968). Program zamanla daha da ilerletilerek çeşitli versiyonları çıkarılmıştır. Bu çalışmada ENPORT programının 4.2. versiyonu kullanılmıştır. Bu versiyon 236, 386 ve daha üstü IBM veya IBM uyumlu PC'lerde çalıştırılabilir. Bunun yanısıra 512 KB hafıza, grafik renk adaptörü (CGA, VGA, EGA) ve yaklaşık 1.2 MB disk alanı gibi özelliklere sahip olan tüm bilgisayarlarda kullanılabilir.

3.2. Programın Çalışması

Programda çeşitli sistemlerin simülasyonu için gerekli işlemler menüler altında yapılır. Programdaki menüler:

a) **File:** Bu menü altında yeni bir model oluşturmak için (New model) opsiyonu seçilir veya mevcut modeller içersinden (Load from file) opsiyonu ile modellerden biri yüklenir. Yine bu menünün altında model hakkında çeşitli bilgilerin yazılabileceği (Edit description) bir seçenek de mevcuttur.

Model dosyaları .ENP uzantılı metin dosyalarıdır ve \ENPORTPC\MODEL dizini içersinde saklanırlar. Dışardan .ENP uzantılı yeni bir model eklendiğinde (Add new file name) seçeneği işaretlenerek bu modelin programa tanıtılması gerekir. Aksi durumda model program tarafından yüklenmez. Yine bu menü altında, (Delete file) seçeneği kullanılarak herhangi bir model dosyası silinebilir.

b) Graph: Bir sistem grafi bu menü altında oluşturulur. Add seçeneği kullanılarak düğümler ve bu düğümler arasına yerleştirilecek bağlantılar eklenir. Çıkartılacak düğüm ve bağlantılar için ise (Delete) seçeneği kullanılır.

Dokuz tane standart bond graf düğüm tipi mevcuttur. Bunlar Se, Sf, C, I, R, TF, GY, 0, 1'dir. Ayrıca sekiz tane de standart blok mevcuttur. Bunlar ise Source, Sink, Distributor, Summer, Gain, Integrator, Function, Transfer Function'dır. Blok düğümlerini diğer tip düğümlerden ayırt etmek için dikdörtgen çerçeve içerisinde gösterilir.

Düğüm, bond ve sinyallere çeşitli isimler verilir. Bu isimler verilirken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Düğüm isimleri bir harfle başlamalı ve en fazla 8 karakter olmak üzere alfanümerik karakterlerden oluşmalıdır. Bağlantı elemanları ise ya bondlar ya da sinyallerdir. Sinyal isimleri bir harfle başlamalı, en fazla 6 alfanümerik karakterden oluşmalıdır. Bond isimleri için harfle başlama zorunluluğu yoktur ve en fazla 5 alfanümerik karakterden ibaret olmalıdır.

c) Equation: Sistem grafi graph menüsü altında oluşturulduktan sonra grafin bir veya birden fazla denkleme sahip olabilen her düğümü, kısmi olarak ya da tamamen tanımlanmalıdır. Belli düğüm tipleri kısmi olarak veya tamamen tanımlı denklemlere sahiptir. Diğerleri ise kullanıcı tarafından giriş yapılarak tanımlanır. Denklemleri tanımlamak için (Edit equations) opsiyonu seçilir ve düğümler burada isteğe göre tanımlanır. Denklemlerin tanımında kolaylık sağlaması için isimli parametreler kullanılabilir. Bu parametreler sabit olarak girilir. Sistem farklı parametreler için çözdürüleceği zaman denklemlerin yeniden tanımlanması yerine kullanılan isimli parametrelerin değerleri değiştirilir ve bu da kullanıcıya büyük kolaylık sağlar. Sistem denklemleri .SEQ uzantılı bir dosyaya yazılabilir ve bu dosyalar \ENPORTPC\SEQ dizini içerisinde saklanır.

0, 1, Dist, Sink, Integrator düğüm tipleri graf tarafından tanımlanan denklemlere sahiptir. C, I, R denklemlerini tanımlamak gerekir. Aynı şekilde Se, Sf, SRC düğümleri de kullanıcı tarafından tanımlanmalıdır. TF, GY düğüm tipleri için ise sadece modül değerlerinin belirtilmesi yeterli olur.

d) Analyse: Bu menü altında lineer olmayan bir modeli lineerleştirmek ve özdeğerlerle özvektörlerini hesaplatmak için gerekli opsiyonlar mevcuttur. Modelin lineer olması durumunda bile durum uzay modeli matrisleri A, B, C, D'yi oluşturmak için model

lineerleştirilmelidir. Lineerleştirilmiş bir modelin A, B, C, D matrisleri ile özdeğerleri ve özvektörleri menüden seçilerek görülebilir. Ayrıca istendiğinde .ABC uzantılı bir dosyaya yazılarak \ENPORT\ABC dizini içersinde saklanabilir.

e) Solve: Bir modelin çözümü için değişik aşamalardan geçilmesi gerekir. İlk basamak diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılacak sayısal analiz metodunun belirlenmesidir. Bu amaçla programda mevcut olan Dört Adımlı Runge-Kutta, Euler, Stiff, Nonstiff sayısal analiz metodlarından biri seçilir. Başlangıç ve bitiş zamanları ile sonuçların saklanacağı aralık girilir. Son aşama olarak da çözüm yaptırılır. Ayrıca durum değişkenlerine başlangıç şartları da bu menu altında verilir.

f) Display: Çözdürülen sistemdeki bir ya da birden fazla değişken (en fazla 6) ya grafik olarak çizdirilebilir ya da tablo formunda görüntülenebilir. Tablo halinde görüntülenen veriler aynı şekilde bir dosyaya yazılabilir ve \ENPORTPC\SEQ dizini içersinde saklanabilir. Bu dosyalar kullanılarak GRAPHER, ASEASY gibi programlar yardımıyla çizimler istenildiği gibi şekillendirilebilir.

g) Utils: ENPORT' un çeşitli özellikleri ve sınırları hakkında bilgilerin mevcut olduğu menüdür. Çözdürülen bir sistemde hata meydana geldiğinde bu hatayı ayıklamak için Debugging opsiyonu da mevcuttur. Ayrıca grafik renk adaptörlerinin seçimide bu menü altında yapılır.

h) Leave: Programdan ayrılıp DOS ortamına dönmeyi sağlar.

Programda oluşturulan modellerin üst sınırları ise şöyle sıralanır. En fazla 100 düğüme, 100 bağlantıya, 60 isimli parametreye, 220 denkleme, 440 toplam denklem girişine, 440 toplam denklem parametresine, 15 durum değişkenine, 15 kaynak girişine, 20 çıkışa sahip bir model için çözüm yapılabilir.

Bond graf modeli elde edilmiş herhangi bir sistemi ENPORT programı ile simüle etmek için izlenecek yol ise şöyledir. Bond graf modeli Graph menüsü altındaki çizim özellikleri kullanılarak elde edilir. Daha sonra equation menüsü ile denklemlerin tanımlamaları yapılır. Sistemin durum uzay gösterimi elde edilmek isteniyorsa Analyse menüsü altında lineerleştirme seçeneği kullanılır. Çözüm kısmında Solve menüsü kullanılarak çözdürülmek istenilen aralık ve başlangıç şartları girilir. Çözümünden sonra da değişkenlerin grafikleri veya tablo sonuçları Display menüsü kullanılarak elde edilir.

4. İKİ DOĞRU AKIM MOTORUNUN AYNİ YÜKÜ BESLEMESİ DURUMUNU BOND GRAF YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

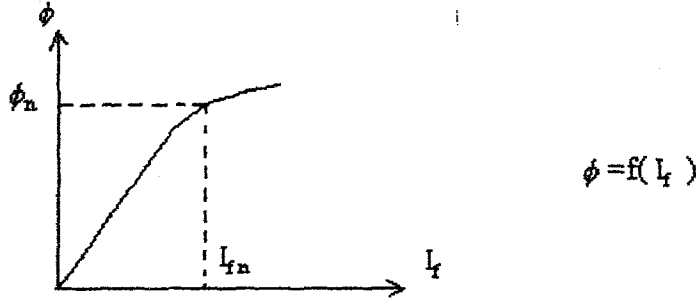
Burada herbiri serbest uyarmalı doğru akım (DC) motoru olan iki doğru akım motorunun aynı yükü beslemesi durumu bond graf yöntemiyle incelendi. Bu amaçla önce serbest uyarmalı bir doğru akım motoru hakkında genel bilgi verildi. Daha sonra sırasıyla serbest uyarmalı bir doğru akım motorunun, seri bağlı iki serbest uyarmalı doğru akım motorunun aynı yükü beslemesi durumunun ve paralel bağlı iki serbest uyarmalı doğru akım motorunun aynı yükü beslemesi durumunun bond graf yöntemiyle incelenmeleri ayrı ayrı başlıklar altında yapıldı. Bu başlıklar altında sistemlerin bond graf modelleri elde edildi. Elde edilen bond graf modelleri kullanılarak sistemlerin motor endüvi akımları ve açısal hızlarının zamana göre değişimlerinin Enport simülasyonu grafiksel sonuçları elde edildi. Sistemlerin Enport grafiksel sonuçlarıyla karşılaştırma imkanı sağlamak için aynı sistemlerin Matlab grafiksel sonuçları da elde edildi.

4.1. Serbest Uyarmalı Doğru Akım Motoru Hakkında Genel Bilgi

1930'lu yıllardan beri, çok iyi elektriksel ve mekanik özelliklere sahip oluşundan dolayı kontrol düzeneklerinin vazgeçilmez unsuru olan doğru akım makinaları; güvenilirliği, aşırı yüklenme yeteneği, hızının hasas olarak kontrol edilebilmesi gibi özellikleri nedeniyle üzerinde en çok uğraşılan konulardan biri olmuştur (Chiliken, 1978; Akın, 1987). Burada konumuzla ilgili olduğu için sadece serbest uyarmalı doğru akım motorlarına kısaca değinilecektir.

Doğru akım motorları uyarma (ya da alan) sargılarının beslenme durumlarına göre isimlendirilirler. Serbest uyarmalı motorda alan sargıları ayrı bir kaynaktan beslenmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sırasıyla doğru akım makinasının kesiti ve eşdeğer devresi verilmiştir.

Serbest uyarmalı motorlarda ϕ nin uyarma akımıyla değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3 ϕ akısının uyarma akımıyla değişimi

Serbest uyarmalı doğru akım makinasının denklemlerini lineer olarak yazabilmek için aşağıdaki ihmal ve varsayımları yapmak gerekir:

1. Fırçalar nötr konumdadır
2. Endüvi reaksiyonu ihmal edilmektedir
3. Doyma ihmal edilmektedir
4. Makine parametreleri sabit olup ısı ve akım ile değişmemektedir
5. Tüm kayıplar hıza bağlı değildir. Bunlar endüvi direncinin içersinde gösterilmiştir.

Bu koşullar altında serbest uyarmalı doğru akım motorunun denklemleri:

$$U_a(t) = I_a(t)R_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E_a(t) \quad (4.1)$$

$$E_a(t) = K_b \phi \omega(t) \quad (4.2)$$

$$M_m(t) = K_m \phi I_a(t) \quad (4.3)$$

$$M_m(t) - M_Y(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (4.4)$$

Şeklinde olacaktır. Doğru akım motorlarında rotor direnci ihmal edildiği zaman güç dengesi ve sürekli rejim koşulları gözönünde bulundurularak K_b nin K_m 'e eşit olduğu söylenebilir. Bu durumda

$$K_b \phi = K_m \phi = K \quad (4.5)$$

eşitliğini yazmak mümkündür. $K_b \phi$ ve $K_m \phi$ yerine (4.2) ve (4.3) eşitliklerinde K yazıldıktan sonra (4.2) denklemi (4.1)'de (4.3) denklemi de (4.4) ' de yerine konularak düzenlenirse;

$$\frac{dI_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} U_a(t) - \frac{R_a}{L_a} I_a(t) - \frac{K}{L_a} \omega(t) \quad (4.6)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{K}{J} I_a(t) - \frac{1}{J} M_Y - \frac{B}{J} \omega(t) \quad (4.7)$$

şeklinde serbest uyarımlı doğru akım motorunun durum denklemleri elde edilir.

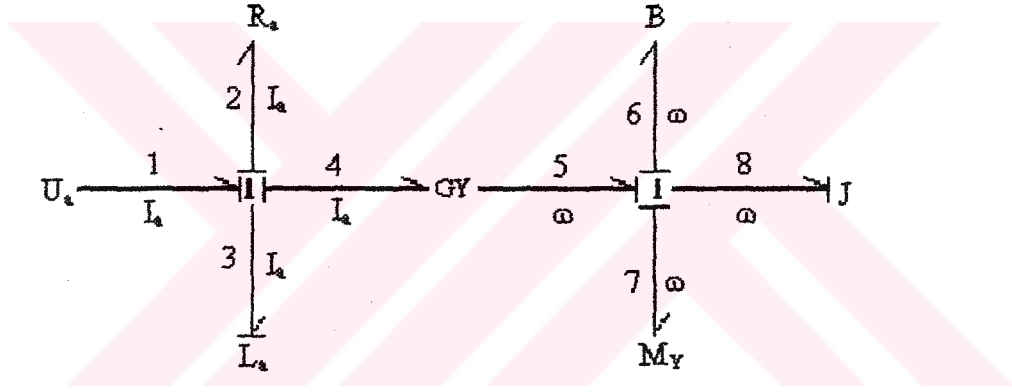
4.2. Serbest Uyarımlı Bir DC Motorunun Bond Graf Yöntemiyle İncelenmesi

Burada öncelikle serbest uyarımlı bir DC motorun bond graf modeli elde edildi. Daha sonra motor parametre değerleri $U_a = 200$ V, $R_a = 2$ Ω , $L_a = 0.03$ H, $J = 0.4$ kg.m², $B = 0.4$ N.m.sn/rad, $K = 2$ N.m/sn ve $M_Y = 10$ N.m için Enport simülasyonu ile endüvi akımı $I_a(t)$ ve motor hızı $\omega(t)$ 'nin zamana göre değişimi elde edildi. Daha Sonra da elde edilen bond graf modeli ve Enport simülasyon sonuçlarının doğruluğunu göstermek için endüvi akımı ve motor hızının zamana göre değişim sonuçlarının Matlab simülasyon sonuçları elde edildi. Bu belirtilen aşamalar sırasıyla verilmiştir.

4.2.1. Motorun Bond Graf Modeli

Serbest uyarmalı doğru akım motorunun Şekil 4.1’de verilen eşdeğer devresinden de anlaşılacağı üzere bu motor iki farklı enerji modundan oluşmaktadır. Bu enerji modlarından biri elektriksel, diğeri ise mekaniktir. Mekanik kısım parametreleri için eski tür analogi (kütle-endüktans benzetimi) kullanılırsa B sürtünmesi R direncine, J döner kütlesi L endüktansına ve M_y yük momenti de v gerilimine karşılık gelir.

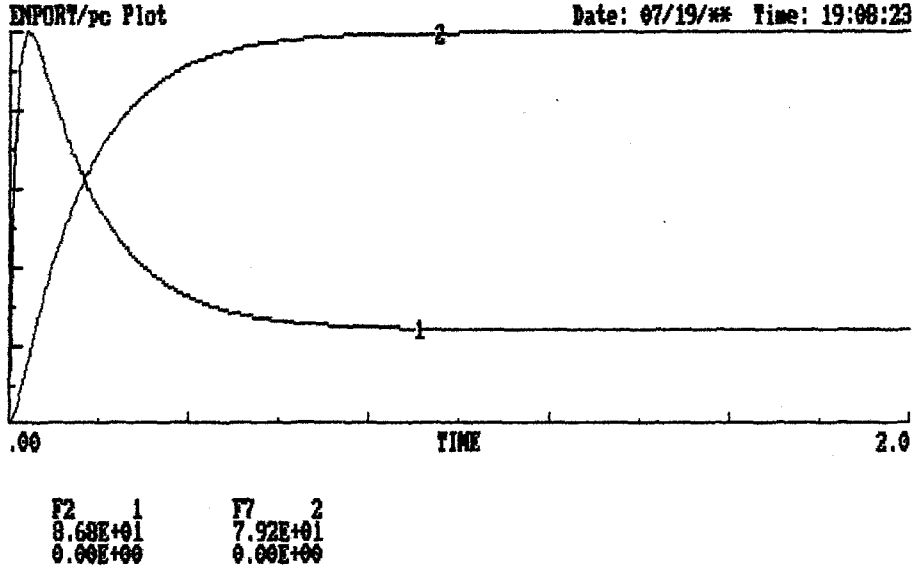
Şekil 4.4’de serbest uyarmalı d.a. motorunun bond graf modeli görülmektedir. Burada bir tarafta elektriksel sistem, diğer tarafta mekanik sistem olmasına rağmen tek tür modelle gösterilmiş ve enerji akışı bond grafa açıkça görülmektedir (Poyraz v.d.,1995).



Şekil 4.4. Serbest uyarmalı doğru akım motorunun bond graf modeli

4.2.2 Motorun Enport Simülasyon Sonuçları

Serbest uyarmalı doğru akım motorunun yukarıda belirtilen parametre değerleri için endüvi akımı $I_a(t)$ ve hızı $\omega(t)$ ’nin zamana göre değişiminin Enport simülasyon sonucu Şekil 4.5 ‘de verildiği gibidir.Enport çıktısı üzerinde F2 endüvi akımına, F7 motor hızına karşılık gelmektedir.

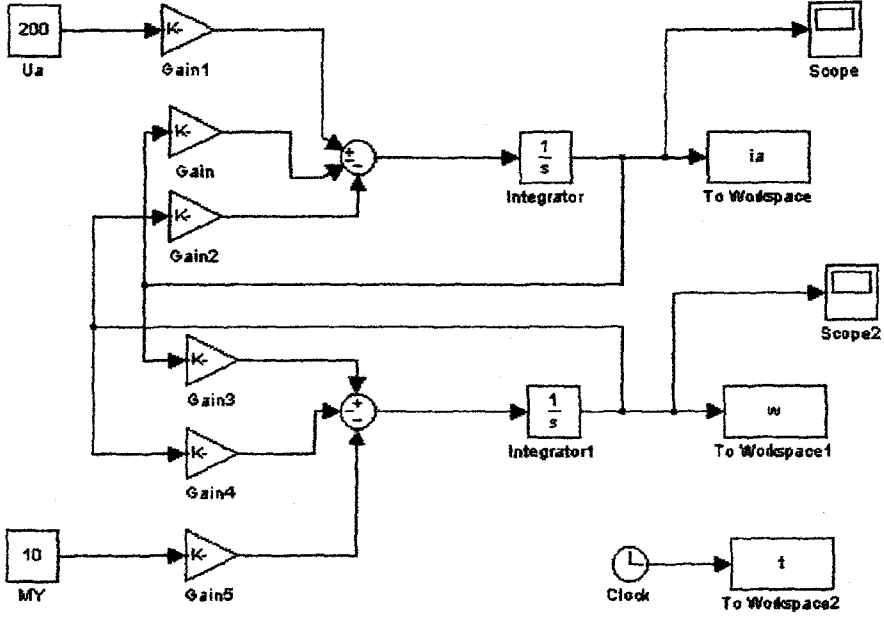


Şekil 4.5. Serbest uyarmalı doğru akım motorunun endüvi akımı (F2) ve açısal hızının (F7) zamana göre değişiminin Enport simülasyonu grafiksel çıktısı

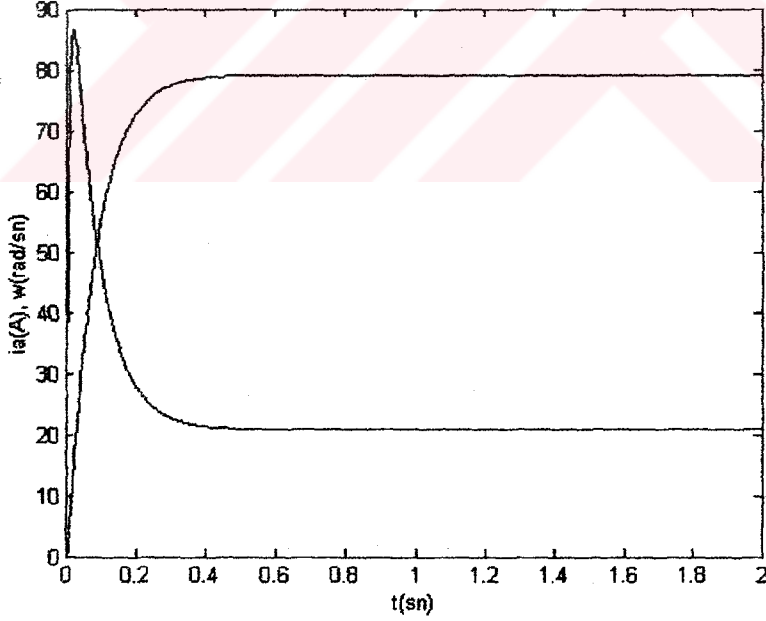
4.2.3 Motorun Matlab simülasyon Sonuçları

Matlab simülasyonu için motorun daha önce verilen (4.6), (4.7) denklemlerinin laplas domeni elde edildi. Elde edilen bu laplas domeni kullanılarak matlab simülasyon için motorun Şekil 4.6'da verilen blok diyagramı modeli elde edildi. Elde edilmiş olan bu blok diyagramına daha önce Enport simülasyonu için aldığımız parametre değerlerinin aynısı girildi. Bu işlemler sonucunda motor hızının ve endüvi akımının zamana göre değişim grafiğinin Matlab simülasyon çıktısı Şekil 4.7'de verildiği gibi olmuştur.

Matlab simülasyonu sonucu elde edilen sonuç ile daha önce elde etmiş olduğumuz Enport sonucu karşılaştırıldığında sonuçların aynı olduğu görülecektir. Bu bize oluşturmuş olduğumuz motorun bond graf modelinin doğruluğunu ve dolayısıyla bond graf modelinin farklı enerji modundaki bir sisteme uygulanabilirliğini göstermiş olmaktadır. Şunuda eklemek gerekir ki Enport ile simülasyon için sistem denklemlerine gerek yoktur. Oysa Matlab simülasyonu için sistem denklemlerinin elimizde olması gerekmektedir.



Şekil 4.6 Matlab simülasyonu için serbest uyarmalı doğru akım motorunun blok diyagramı



Şekil 4.7. Serbest uyarmalı doğru akım motorunun endüvi akımı ve açısal hızının zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu grafiksel çıktısı

4.3 Seri Bağlı İki Serbest Uyarmalı DC Motorun Aynı Yüğü Beslemesi Durumunun Bond Graf Yöntemiyle incelenmesi

Seri bağlı iki serbest uyarmalı DC motorun aynı yüğü beslemesi durumu bond graf yöntemiyle incelenirken aşamalı bir yol izlendi. İlk önce sistemin eşdeğer devresi ve durum denklemleri verildi. Daha sonra sisteme ait bond graf modeli elde edildi. Sonra da sistemin Enport simülasyonu yapılarak endüvi akım ve motor hızının zamana göre değişimi elde edildi. Son aşama olarak da bond graf modeli kullanılarak elde edilen Enport simülasyon sonuçlarının doğruluğunu göstermek amacıyla bir de sistemin Matlab simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Sistem içerisinde yer alan iki serbest uyarmalı DC motor eş motorlardır. Yani iki motorun karşılıklı tüm parametreleri birbirine eşit alındı.

4.3.1. Sistemin Eşdeğer Devresi ve Durum Denklemleri

Sistem olarak adlandırdığımız seri bağlı iki serbest uyarmalı DC motorun aynı yüğü beslemesi durumu için eşdeğer devresi Şekil 4.8’de verildiği gibidir. Daha önce serbest uyarmalı bir DC motor için yapılan kabul ve ihmallere burada da yapılacak olursa, sistemin denlemleri aşağıda verildiği gibi olur.

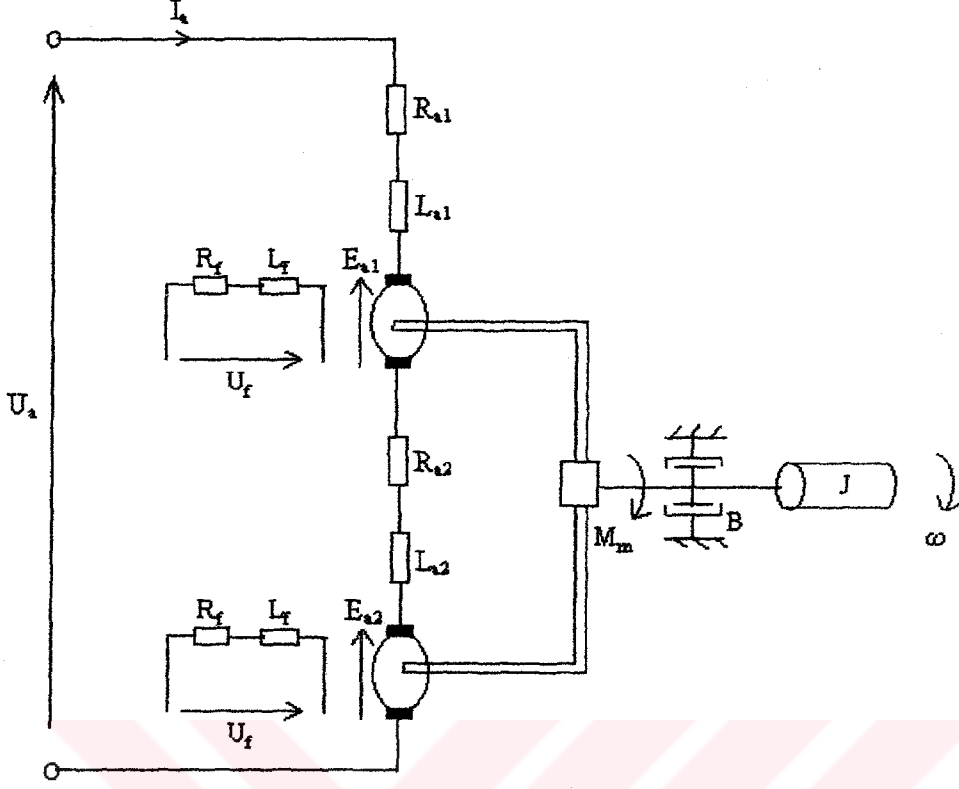
$$U_a(t) = (R_{a1} + R_{a2}) \cdot I_a(t) + (L_{a1} + L_{a2}) \frac{dI_a(t)}{dt} + E_{a1}(t) + E_{a2}(t) \quad (4.8)$$

$$E_{a1}(t) = K_1 \omega(t) \quad (4.9)$$

$$E_{a2}(t) = K_2 \omega(t) \quad (4.10)$$

$$M_m(t) = (K_1 + K_2) \cdot I_a(t) \quad (4.11)$$

$$M_m(t) - M_Y = (J_1 + J_2) \frac{d\omega(t)}{dt} + (B_1 + B_2) \omega(t) \quad (4.12)$$



Şekil 4.8. Sistemin eşdeğer devresi

(4.9) ve (4.10) denklemleri (4.8)'de (4.11) denklemi de (4.12)'de yerine konularak elde edilen denklemler düzenlenirse;

$$\frac{dI_a(t)}{dt} = \frac{U_a(t)}{L_{a1} + L_{a2}} - \frac{R_{a1} + R_{a2}}{L_{a1} + L_{a2}} I_a(t) - \frac{K_1 + K_2}{L_{a1} + L_{a2}} \omega(t) \quad (4.13)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{K_1 + K_2}{J_1 + J_2} I_a(t) - \frac{1}{J_1 + J_2} M_Y - \frac{B_1 + B_2}{J_1 + J_2} \omega(t) \quad (4.14)$$

şeklinde sistemin durum denklemleri elde edilmiş olur. Burada elde edilen (4.13) ve (4.14) denklemleri sistemin Matlab simülasyonu için gerekli iki denklemdir.

4.3.2. Sistemin Bond Graf Modeli

Seri bağlanmış iki serbest uyarmalı DC motorun Şekil 4.8’de verilen eşdeğer devresinden anlaşılacağı üzere sistem iki farklı enerji modundan oluşmaktadır. Bu enerji modlarından biri elektriksel, diğeri ise mekaniktir. Daha önce mekanik kısım için tek motorda yapılan kütle-endüktans benzetimi bu sistem için de yapılabilir. Bu benzetim kullanılırsa B_1 ve B_2 sürtünmeleri dirençler olarak, J_1 ve J_2 döner kütleleri endüktanslar olarak ve M_Y yük momenti gerilim olarak alınır. Sistemde yer alan iki motor eş iki motordur. Dolayısıyla parametreleri arasında karşılıklı olarak $L_{a1}=L_{a2}$, $R_{a1}=R_{a2}$, $J_1=J_2$, $B_1=B_2$ ve $K_1=K_2$ şeklinde eşitlikler söz konusudur. Sistemin bond graf modeli elde edilirken parametreler arasında

$$L_{a1} + L_{a2} = L_a \quad (4.15)$$

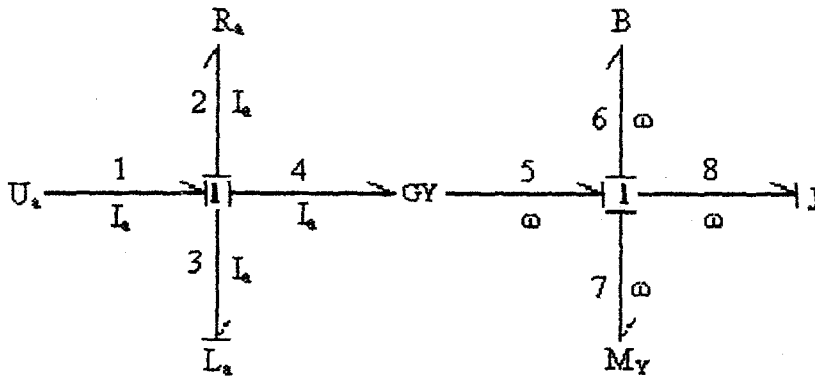
$$R_{a1} + R_{a2} = R_a \quad (4.16)$$

$$J_1 + J_2 = J \quad (4.17)$$

$$K_1 + K_2 = K \quad (4.18)$$

$$B_1 + B_2 = B \quad (4.19)$$

şeklinde eşitlikler yazmak da mümkündür. Bu eşitlikler ve yapılan kütle-endüktans benzetimi göz önüne alınırsa sistemin bond graf modeli Şekil 4.9’da verildiği gibi olur.

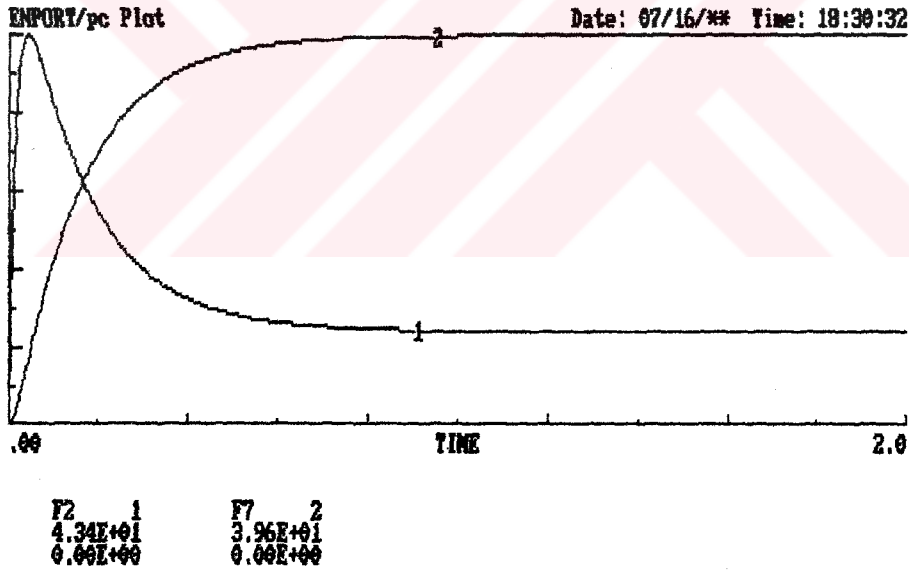


Şekil 4.9. Sistemin bond graf modeli

Bond graf modeli ile elektriksel ve mekanik kısımdan oluşan sistem tek bir modelle gösterilmiş oldu.

4.3.3. Sistemin Enport Simülasyon Sonuçları

Seri bağlı iki serbest uyarmalı DC motorun aynı yükü beslemesi durumunun Enport simülasyonu için alınan parametre değerleri $L_{a1}=L_{a2}=0.03$ H, $R_{a1}=R_{a2}=2$ Ω , $J_1=J_2=0.4$ kg.m², $B_1=B_2=0.4$ N.m.sn/rad, $M_Y=10$ Nm, $U_a=200$ V, $K_1=K_2=2$ Nm/A şeklindedir. Enport simülasyonu için bu değerler girildiğinde sistemin endüvi akımı $I_a(t)$ ve açısal hızı $\omega(t)$ 'nin zamana göre değişiminin Enport simülasyonu grafiksel çıktısı Şekil 4.10'da verildiği gibi olur. Şekil üzerinde F2 endüvi akımına F7 açısal hızı karşılık gelmektedir.

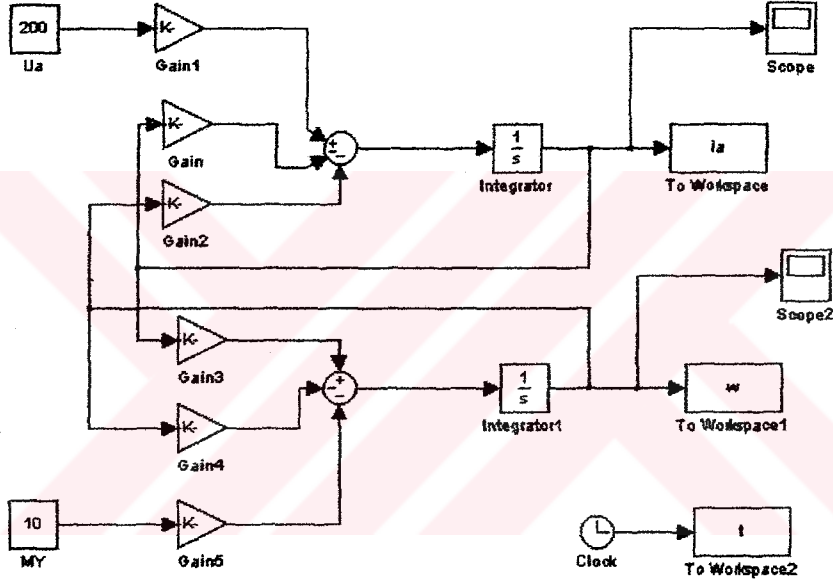


Şekil 4.10. Sistemin Endüvi akımı (F2) ve açısal hızının (F7) zamana göre değişiminin Enport Simülasyonu grafiksel çıktısı

Enport simülasyonu için burda elde edilen akım, hız değerleri daha önce tek motor için elde edilen akım, hız değerlerinin yarısıdır.

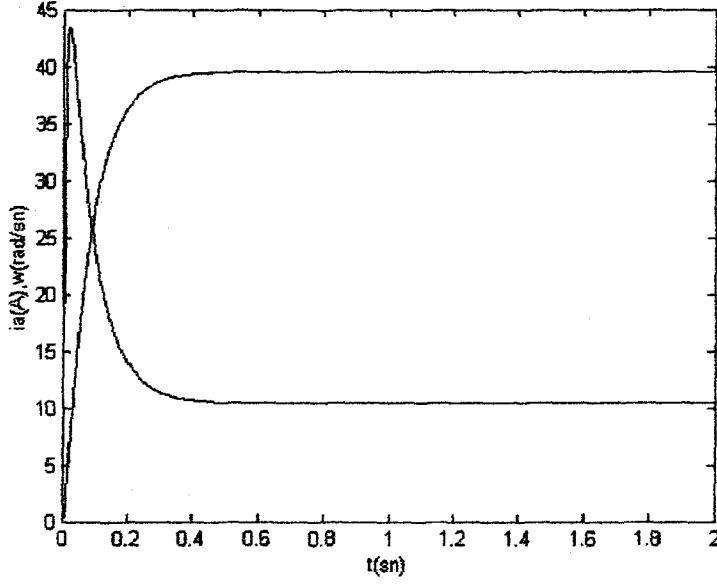
4.3.4 Sistemin Matlab Simülasyon Sonuçları

Seri bağlı iki DC motorun aynı yükü beslemesi durumunun Matlab simülasyonu için (4.13) ve (4.14) denklemleri yardımıyla Şekil 4.11'de verilen sistemin blok diyagramı oluşturuldu. Daha sonra Enport simülasyonu için kullanılan parametre değerlerinin aynıları burda da kullanılarak sistemin endüvi akımı ve açısal hızının zamana göre değişimleri Şekil 4.12'de verildiği gibi elde edildi.



Şekil 4.11. Matlab simülasyonu için sistemin blok diyagramı

Sistemin oluşturulan blok diyagramı dikkatlice incelenecek olursa, daha önce bir serbest uyarmalı DC motor için oluşturulan 4.6'daki blok diyagramının aynısıdır. Bu aynılık iki sistemin durum denklemlerinden kaynaklanmaktadır. Çünkü bir DC motor ve birbirine seri bağlı iki DC motorun durum denklemleri birbirine benzerlik arz etmektedir. Sistemlerin durum denklemleri arasındaki tek fark durum denklemlerini oluşturan terimlerin katsayılarının farklı olmasıdır.



Şekil 4.12. Sistemin endüvi akımı ve açısal hızının zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu çıktısı

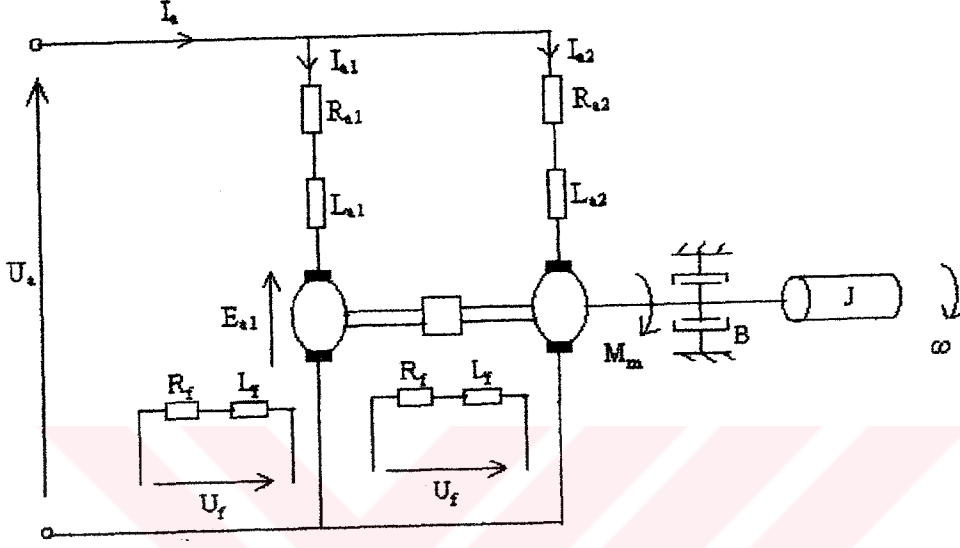
Seri bağlı iki DC motorun aynı yükü beslemesi durumunun Matlab simülasyonu sonucu elde edilen endüvi akımı $I_a(t)$ ve açısal hızı ω 'nin zamana göre değişim değerleriyle, aynı sistem için Enport simülasyonu sonucu elde edilen akım ve hızın zamana göre değişim değerleri eşit çıkmıştır. Bu sonuç sistemin elde edilen bond graf modelinin doğruluğunu göstermektedir. Ayrıca sistem denklemlerine ihtiyaç kalmadan bond graf modelinin farklı enerji modlarından oluşan sistemlere uygulanabilirliğini de göstermektedir.

4.4. Paralel Bağlı İki Serbest Uyarımlı DC Motorun Aynı Yükü Beslemesi Durmunun Bond Graf Yöntemiyle İncelenmesi

Paralel bağlı iki serbest uyarımlı DC motorun aynı yükü beslemesi durumu bond graf yöntemiyle incelenirken daha önce seri bağlı iki DC motorun aynı yükü beslemesi durumunun bond graf yöntemiyle incelenmesinde izlenen yol izlenmiştir. Yine burda da paralel bağlı iki DC motor eş iki motordur. Yani motorların karşılıklı parametreleri eşit alındı.

4.4.1. Sistemin Eşdeğer devresi ve Durum Denklemleri

Sistemin (paralel bağlı iki serbest uyarmalı DC motorun aynı yükü beslemesi durumunun) eşdeğer devresi Şekil 4.13’de verildiği gibidir.



4.13. Sistemin eşdeğer devresi

Burada da daha önce bir serbest uyarmalı DC motor için yapılan ihmal ve kabuller yapılırsa sistem denklemleri aşağıda verildiği gibi olur.

$$U_a(t) = R_{a1} \cdot I_{a1}(t) + L_{a1} \frac{dI_{a1}(t)}{dt} + E_{a1}(t) \quad (4.20)$$

$$U_a(t) = R_{a2} \cdot I_{a2}(t) + L_{a2} \frac{dI_{a2}(t)}{dt} + E_{a2}(t) \quad (4.21)$$

$$E_{a1}(t) = K_1 \cdot \omega(t) \quad (4.22)$$

$$E_{a2}(t) = K_2 \cdot \omega(t) \quad (4.23)$$

$$M_m(t) = K_1 \cdot I_{a1} + K_2 \cdot I_{a2}(t) \quad (4.24)$$

$$M_m(t) - M_Y = (J_1 + J_2) \frac{d\omega(t)}{dt} + (B_1 + B_2) \cdot \omega(t) \quad (4.25)$$

(4.22) denklemi (4.20)'da (4.23) denklemi (4.21)'de ve (4.24) denklemi de (4.25)'de yerine konularak elde edilen denklemler düzenlenirse;

$$\frac{dI_{a1}(t)}{dt} = \frac{U_a(t)}{L_{a1}} - \frac{R_{a1}}{L_{a1}} I_{a1}(t) - \frac{K_1}{L_{a1}} \omega(t) \quad (4.26)$$

$$\frac{dI_{a2}(t)}{dt} = \frac{U_a(t)}{L_{a2}} - \frac{R_{a2}}{L_{a2}} I_{a2}(t) - \frac{K_2}{L_{a2}} \omega(t) \quad (4.27)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{K_1}{J_1+J_2} I_{a1}(t) + \frac{K_2}{J_1+J_2} I_{a2}(t) - \frac{1}{J_1+J_2} M_Y - \frac{B_1+B_2}{J_1+J_2} \omega(t) \quad (4.28)$$

şeklinde seri bağlı iki DC motorun aynı yükü beslemesi durumuna ait durum denklemleri elde edilmiş olur.

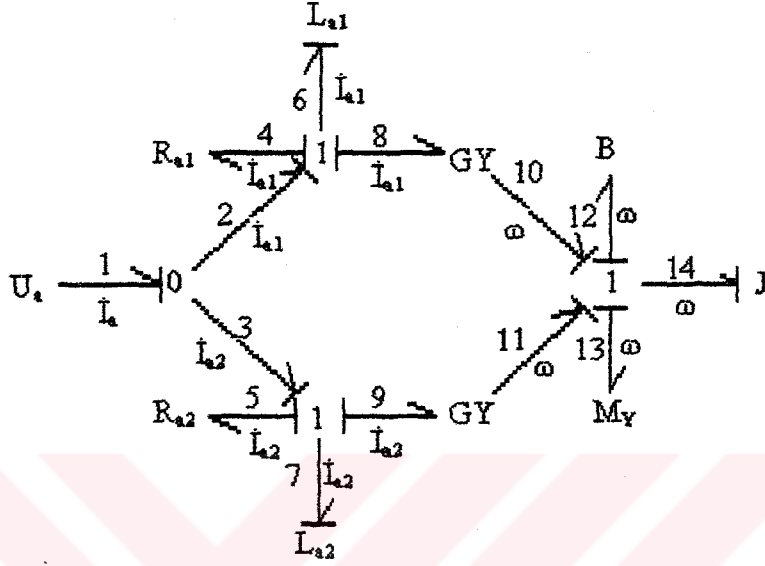
4.4.2. Sistemin Bond Graf Modeli

Paralel bağlanmış iki serbest uyarımlı DC motorun Şekil 4.13'de verilen eşdeğer devresinden anlaşılacağı üzere sistem iki farklı enerji modundan oluşmaktadır. Bu enerji modlarından biri elektriksel, diğeri ise mekaniktir. Daha önce mekanik kısım için tek motor ve seri bağlanmış iki DC motorda yapılan kütle-endüktans benzeşimi bu sistem için de yapılabilir. Bu benzeşim kullanılırsa B_1 ve B_2 sürtünmeleri dirençler olarak, J_1 ve J_2 döner kütleleri endüktanslar olarak ve M_Y yük momenti gerilim olarak alınır. Sistemde yer alan iki motor eş iki motordur. Dolayısıyla parametreleri arasında karşılıklı olarak $L_{a1}=L_{a2}$, $R_{a1}=R_{a2}$, $J_1=J_2$, $B_1=B_2$ ve $K_1=K_2$ şeklinde eşitlikler söz konusudur. Ayrıca sistemin bond graf modeli elde edilirken sistemde yer alan iki motorun sürtünme ve atalet moment katsayıları için

$$J_1+J_2=J \quad (4.29)$$

$$B_1+B_2=B \quad (4.30)$$

eşitliklerini yazmak da mümkündür. (4.29) , (4.30) eşitlikleri ve sistemdeki iki motorun eş iki motor olduğu göz önüne alınırsa sistemin (paralel bağlı iki DC motorun aynı yükü beslemesi durumunun) bond graf modeli Şekil 4.14’de verildiği gibi olur.



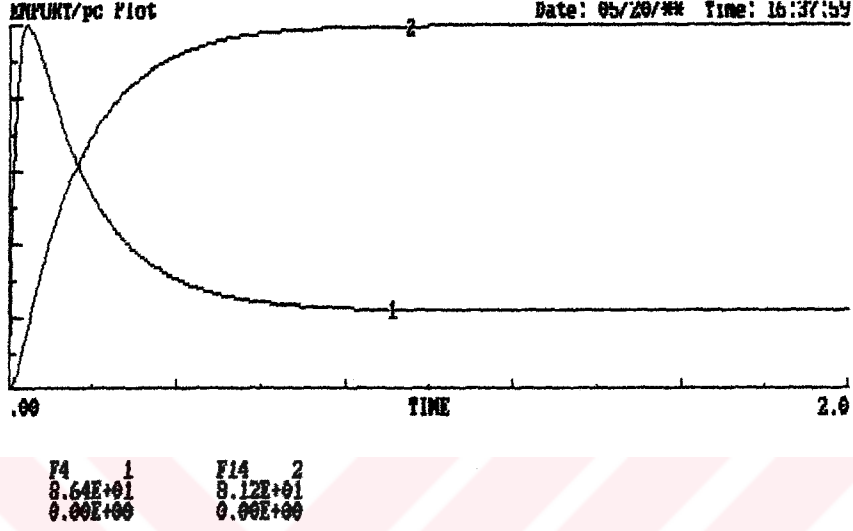
Şekil 4.14 Sistemin bond graf modeli

Mekanik ve elektriksel kısımlardan oluşan sistem bond graf modeli ile tek model olarak ifade edilmiş oldu.

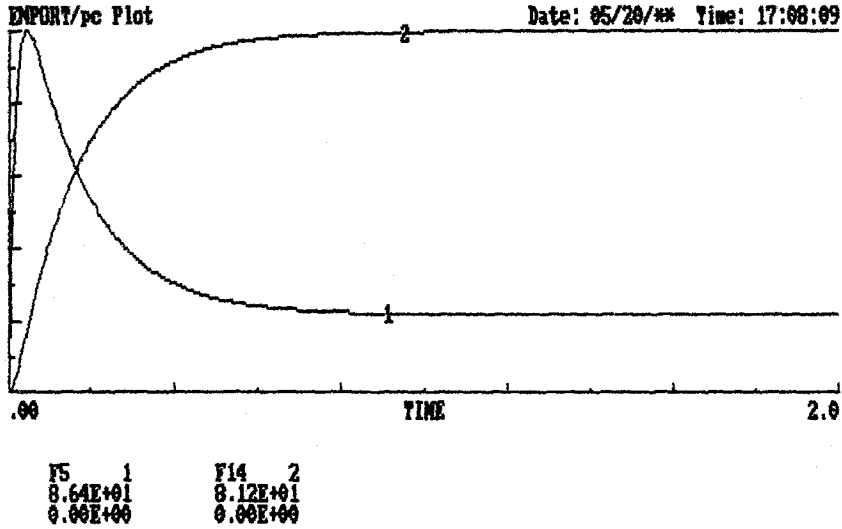
4.4.3. Sistemin Enport Simülasyon Sonuçları

Burada bond graf modeli kullanılarak paralel bağlı iki DC motorun aynı yükü beslemesi durumunda, endüvi akımları $I_{a1}(t)$, $I_{a2}(t)$ ve açısal hız $\omega(t)$ 'nin zamana göre değişimlerinin grafiksel sonuçları Enport simülasyonu ile elde edilmiştir. Simülasyon için kullanılan parametre değerleri seri bağlı iki DC motorda kullanılan parametre değerlerine eşit alındı. Sistemde yer alan birinci motorun endüvi akımı $I_{a1}(t)$ ve açısal hız $\omega(t)$ 'nin zamana göre değişiminin Enport çıktısı Şekil 4.15’de verildiği gibidir.

Sistemde yer alan ikinci motorun endüvi akımı $I_{a2}(t)$ ve açısal hızı $\omega(t)$ 'nin zamana göre değişiminin Enport simülasyon çıktısı da Şekil 4.16'da verildiği gibidir.



Şekil 4.15. Endüv akımı $I_{a1}(t)$ ve sistem açısal hızı $\omega(t)$ 'nin zamana göre değişiminin Enport çıktısı

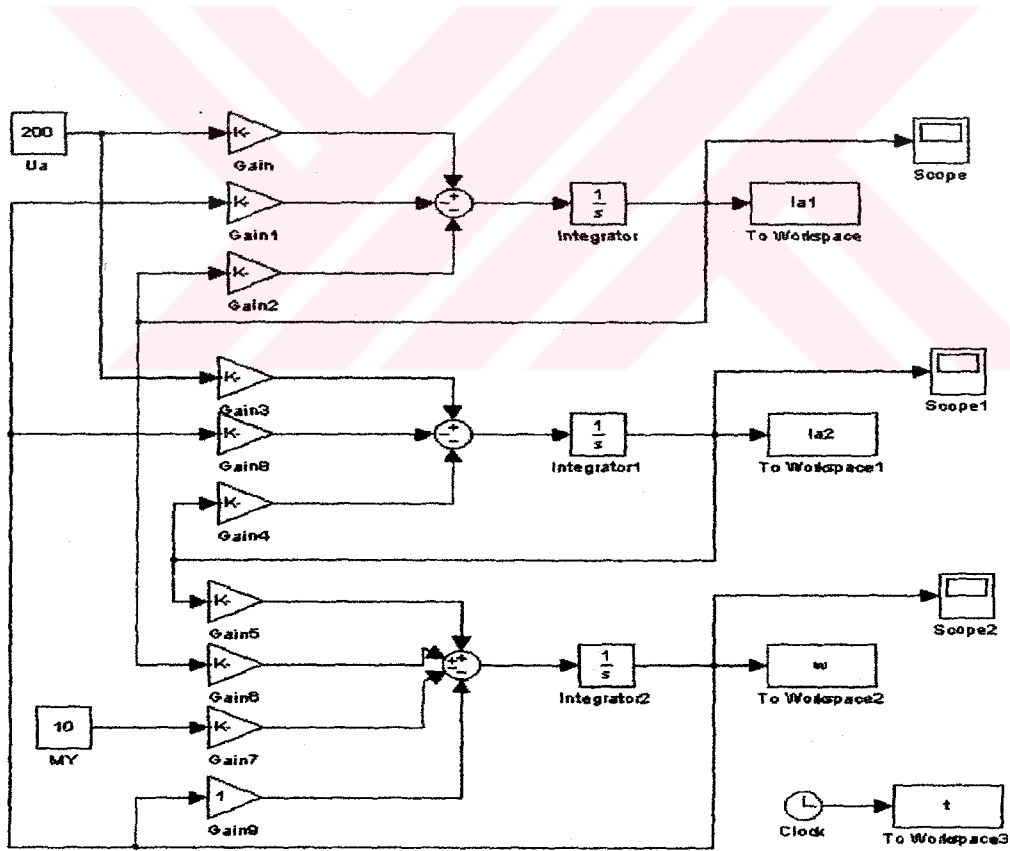


Şekil 4.16. Motor endüvi akımı $I_{a2}(t)$ ve sistem hızı $\omega(t)$ 'nin zamana göre değişiminin Enport çıktısı

Burada motor açısai hızları aynı zamanda sistem açısai hızıdır. Simölasyon çıktılarımda ki F4 ve F5 sırasıyla motor endüvi akımları $I_{a1}(t)$ ve $I_{a2}(t)$ 'ye karşılık gelmektedir. F14 ise sistem açısai hızı $\omega(t)$ 'ye veya motor açısai hızlarına karşılık gelmektedir.

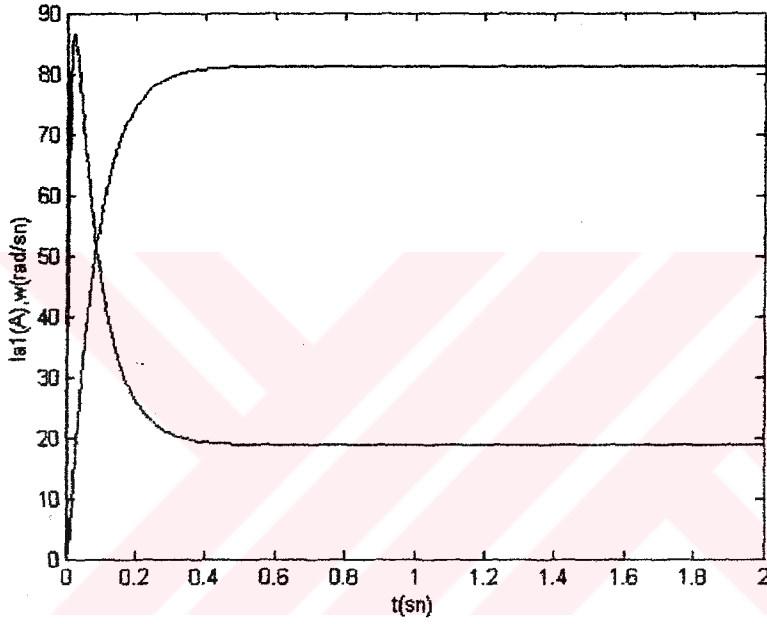
4.4.4 Sistemin Matlab Simölasyon Sonuçları

Sistemin (Paralel bağlı iki DC motorun aynı yökü beslemesi durumunun) Matlab simölasyonu için sistemin daha önce elde edilen (4.26), (4.27) ve (4.28) denklemleri kullanılarak sistemin Şekil 4.17'de verilen blok diyagramı oluşturuldu. Elde edilen blok diyagrama motor parametre değerleri girilerek, sistemin motor endüvi akımları $I_{a1}(t)$, $I_{a2}(t)$ ve sistem açısai hızı $\omega(t)$ 'nin zamana göre değişiminin Matlab simölasyonu

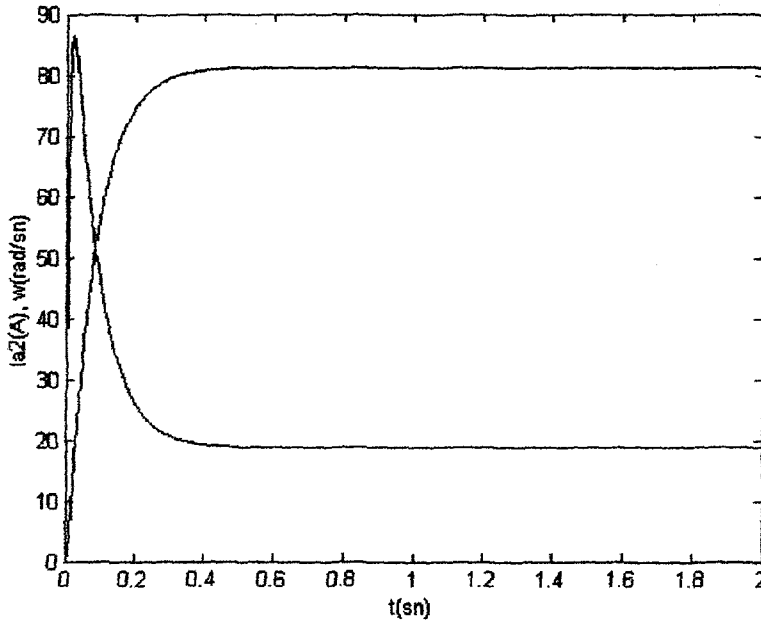


Şekil 4.17. Matlab simölasyonu için sistemin blok diyagramı

Grafiksel sonuçları elde edildi. Bu sonuçlar için kullanılan motor prametre değerleri daha önce aynı sistemin Enport simülasyonu için kullanılan motor parametre değerlerine eşit alındı. Sistemde yer alan birinci motorun endüvi akımı $I_{a1}(t)$ ve sistem açısal hızının zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu grafiksel sonucu Şekil-4.18’de verildiği gibidir. İkinci motorun endüvi akımı $I_{a2}(t)$ ve sistem açısal hızının zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu grafiksel sonucu ise Şekil 4.19’da gibidir.



Şekil 4.18 Endüvi akımı I_{a1} ve sistem açısal hızının zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu grafiksel çıktısı



Şekil 4.18 Endüvi akımı I_{a2} ve sistem açısal hızının zamana göre değişiminin Matlab simülasyonu grafiksel çıktısı

Paralel bağlı iki DC motorun aynı yükü beslemesi durumunun Matlab simülasyonu sonucu elde edilen grafiksel sonuçlarıyla (Şekil 4.17, Şekil 4.18) aynı sistemin daha önce bond graf modeli kullanılarak elde edilen Enport grafiksel sonuçları (Şekil 4.15, Şekil 4.16) örtüşmektedir. Bu sonuç sistemin elde edilen bond graf modelinin doğruluğunu göstermektedir. Ayrıca sistem denklemlerine ihtiyaç duymadan bond graf modelinin farklı enerji modlarından oluşan sistemlere uygulanabilirliği de ortaya çıkmış olmaktadır.

5. SONUÇ

İki veya daha fazla sayıda doğru akım motorunun seri veya paralel bağlanmasına yük momentinin büyük olduğu veya endüvi gerilimi yada akımın sınırlı olması nedeniyle gereksinim duyulur. Daha çok cer sistemlerinde kullanılırlar.

Doğru akım motorlarının aynı yükü besleyecek şekilde paralel veya seri bağlanarak çalıştırılması tek bir doğru akım motoruna göre daha karmaşık bir yapı oluşturur. Klasik çalışmada bu sistemlerin analizi için öncelikle matematik modellerinin elde edilmesine gerek duyulur. Daha sonra bu matematik modeller çözdürülerek istenilen çıkış değişkeni incelenir. Oysa bu çalışmamızda kullanılan bond graf modelinde sistemlerin matematik modellerini bulmaya gerek yoktur. Sadece sistemlerin bond graf modelleri elde edilirse, Enport paket programı matematik modele ilişkin katsayı matrislerini vererek çözümü de yapıp istenilen çıkışların zamana bağlı değişimini grafiksel ve analitik olarak elde eder. Bu da sistemlerin analizi için önemli bir kolaylık sağlar.

Bu çalışmada iki eşdeğer serbest uyaramalı doğru akım motorunun seri ve paralel bağlı durumlarının aynı yükü beslemesi durumu bond graf yöntemiyle incelenmiştir. Bu amaçla sistemlerin bond graf modeli elde edilerek Enport simülasyonu yardımıyla dinamik sistemlerin çıkış olarak seçilen endüvi akımları $I_a(t)$, $I_{a1}(t)$, $I_{a2}(t)$ ve açısal hız $w(t)$ 'nin zamana göre değişiminin grafiksel sonuçları elde edilmiştir. Aynı sistemlerin elde edilen klasik denklemleri kullanılarak sistemlerin Matlab simülasyonu için blok diyagramları oluşturuldu. Matlab simülasyonu ile sistemlerin elde edilen endüvi akımları ve hızlarının Enport simülasyonu ile elde edilen endüvi akımları ve hızlarıyla aynı olduğu görülmüştür. Bu sonuç sistemlerin elde edilen bond graf modellerinin doğruluğunu kanıtlamıştır. Farklı enerji modundan oluşan bu tür karmaşık yapıları sistemlerin bond graf modellerini kullanarak enport simülasyonunu yapmak Matlab ve diğer simülasyonlara göre daha pratik olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

Paynter, H.M., 1961, Analysis and Design of Engineering Systems, MIT press, Cambridge, Mass.

Şen, N., 1973, Dinamik Sistem Modelrinde Enerji Bağlaçları, Doçentlik Tezi, KTÜ, Trabzon

Rosenberg, R.C., 1974, A User's Guide to Enport-4, John Wiley and Sons, New York.

Şen, N., 1977, Dinamik Sistemlerin Birleştirilmiş Analizinde Bağlaç Diyagramları Tekniğinin Kullanılışı, İTÜ Dergisi, Cilt 35, Sayı 5.

Chiliken, M., 1978, Elektrik Drive, MIR Publishers, Moscow

Poyraz, M., 1981, Enzim Reaksiyon Sistemlerinin Otomatik Kontrol ve Sistem Analizi Yöntemleri ile Model ve simülasyonu, Doktora Tezi, DMMA Akademisi, Elazığ, Sayfa 19.

Blundell, A.J., 1982, Bond Graphs For Modelling Engineering Systems, New York, 32

Rosenberg, R.C., Karnopp, D.C., 1983, Introduction To Physcal Systems Dynamics

Granada, J.J., 1985, Computer Generation of Physical System Differential Equations Using bond Graphs, J. Franklin Inst., Volume 319, pp. 243-255.

Akın, E., 1987, Doğru Akım Motorlarında Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

Karnopp, D.C., Margolis, D.L., Rosenberg, R.C., 1990, System Dynamics

Yıldırım, S., 1993, Elektrik Devrelerinin Analizinde Bond Graf Modeli ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

Poyraz, M., Özdemir, M., Gülten, A., 1995, DC Motorun Frenlenmesinde Bond Graf Modelinden Yararlanarak Enport Simülasyonu, Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, pp. 426-429, Bursa.

Demir, Y., Poyraz, M., Köksal, M., 1997, Derivation of State and Output Equations for Systems Containing Switches and a Novel Definition of a Switch Using the Bond Graph Model, The Journal of the Franklin Institute, 334B, 2pp. 191-197.

Demir, Y., Poyraz, M., 2000, Bağlaç Diyagramı Modelinden Yararlanarak Parça-Parça Doğrusal Devrelerin Transfer Fonksiyonlarının Bulunması, F.Ü. Fen ve Müh. Bilimler Dergisi 12(2), pp. 119-124

EK-1 Serbest Uyarmalı Bir Doğru Akım Motorunun Sistem Denklemleri

```

*****
*
*           SYSTEM EQUATIONS File written by ENPORT
*
*   Model: MODEL000      File: DCMOTOR.SEQ      Date: 07/28/**
*
*   Default model title...
*
*****

The Named Parameters:
1   UA      2.00000E+02
2   RA      2.00000E+00
3   LA      3.00000E-02
4   B       4.00000E-01
5   J       4.00000E-01
6   K       2.00000E+00
7   MY      1.00000E+01
*

The System Equations:
E1   = 2.00000E+02
E2   = 2.00000E+00 * F2
F3   = 3.33333E+01 * P3
P3   = INTEGRAL( E3      )
MJR  = 2.00000E+00
E4   = 1.0          *MJR      *F5
E5   = 1.0          *MJR      *F4
F1   = F3
F2   = F3
F4   = F3
E3   = 1.0          * E1
*    -1.0          * E2
*    -1.0          * E4
F5   = F8
F6   = F8
F7   = F8
E8   = 1.0          * E5
*    -1.0          * E6
*    -1.0          * E7
E6   = 4.00000E-01 * F6
F8   = 2.50000E+00 * P8
P8   = INTEGRAL( E8      )
E7   = 1.00000E+01
*
*****

```

**EK-2 Seri Bağlı İki Serbest Uyarmalı DC Motorunun Aynı Yüklü Beslemesi Durumu için
Sistem Denklemleri**

```
*****
*
*          SYSTEM EQUATIONS File written by ENPORT
*
*   Model: MODEL000      File: SERIDC.SEQ      Date: 07/28/**
*
*   Default model title...
*
*****
```

The Named Parameters:

```
1  UA      2.00000E+02
2  RA      1.00000E+00
3  LA      3.00000E-02
4  B       4.00000E-01
5  J       4.00000E-01
6  K       2.00000E+00
7  MY      1.00000E+01
```

The System Equations:

```
E1  = 2.00000E+02
F1  = F3
F2  = F3
F4  = F3
E3  = 1.0      * E1
*   -1.0      * E2
*   -1.0      * E4
E2  = 4.00000E+00 * F2
F3  = 1.66667E+01 * P3
P3  = INTEGRAL( E3      )
MJR = 4.00000E+00
E4  = 1.0      *MJR      *F5
E5  = 1.0      *MJR      *F4
F5  = F8
F6  = F8
F7  = F8
E8  = 1.0      * E5
*   -1.0      * E6
*   -1.0      * E7
E6  = 8.00000E-01 * F6
E7  = 1.00000E+01
F8  = 1.25000E+00 * P8
P8  = INTEGRAL( E8      )
```

```
*****
```

EK-3 Paralel Bağlı İki Serbest Uyarmalı DC Motorunun Aynı Yüğü Beslemesi Durumu
İçin Sistem Denklemleri

```
*****
*
*                               SYSTEM EQUATIONS File written by ENPORT
*
* Model: MODEL000      File: PARALEDC.SEQ      Date: 07/28/**
*
* Default model title...
*
*****
```

The Named Parameters:

```
1  UA      2.00000E+02
2  RA1     2.00000E+00
3  RA2     2.00000E+00
4  LA1     3.00000E-02
5  LA2     3.00000E-02
6  B       8.00000E-01
7  J       8.00000E-01
8  K       2.00000E+00
9  MY      1.00000E+01
```

The System Equations:

```
E2 = E1
E3 = E1
F1 = 1.0      * F2
*      +1.0      * F3
F2 = F6
F4 = F6
F8 = F6
E6 = 1.0      * E2
*      -1.0      * E4
*      -1.0      * E8
F3 = F7
F5 = F7
F9 = F7
E7 = 1.0      * E3
*      -1.0      * E5
*      -1.0      * E9
E4 = 2.00000E+00 * F4
F6 = 3.33333E+01 * P6
P6 = INTEGRAL( E6 )
F7 = 3.33333E+01 * P7
P7 = INTEGRAL( E7 )
DEFAULT= 2.00000E+00
E8 = 1.0      *DEFAULT *F10
```

```
E10  =  1.0          *DEFAULT *F8
DEFAULT= 2.00000E+00
E9   =  1.0          *DEFAULT *F11
E11  =  1.0          *DEFAULT *F9
F10  =  F14
F11  =  F14
F12  =  F14
F13  =  F14
E14  =  1.0          * E10
*      +1.0          * E11
*      -1.0          * E12
*      -1.0          * E13
F14  =  1.25000E+00 * P14
P14  =  INTEGRAL( E14 )
E12  =  8.00000E-01 * F12
E13  =  1.00000E+01
E1   =  2.00000E+02
E5   =  2.00000E+00 * F5
```

```
*
*****
```

