

22030

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMİNİN

MODELLENMESİ VE SİMULASYONU

T22030

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Salman KURTULAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 17 Mart 1992

Tezin Savunulduğu Tarih : 5 Haziran 1992

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Atilla BİR

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. M.Kemal SARIOĞLU

Prof. Dr. Atif URAL

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

HAZİRAN 1992

ÖNSÖZ

İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Bilgisayar Programı çerçevesinde gerçekleştirilen bu çalışmada, elektrikli ulaşım sistemlerinin analiz ve tasarımında kullanılmak üzere, bir simülasyon programı geliştirilmiştir.

Çalışmamı yönlendiren, her konuda değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen hocam ve tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Atilla Bir'e, elektrikli ulaşım konusundaki değerli bilgilerinden yararlandığım hocam Sayın Mahmut Kayral'a ve Kontrol ve Kumanda Anabilim Dalı'nın tüm üyelerine teşekkür ederim.

Salman KURTULAN
Haziran , 1992

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. SİSTEMİN TANITILMASI.....	8
BÖLÜM 3. SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ.....	13
3.1. Tahrik Düzeni.....	13
3.2. Hareket Denklemi.....	13
3.2.1. Kütle Arttırma katsayısı	14
3.2.2. Toplam Taşıt Çekme kuvveti	14
3.2.3. Toplam Seyir Direnci.....	15
3.2.3.1. Sürtünme-Hava Direnci.....	15
3.2.3.2. Eğim Direnci.....	16
3.2.3.3. Dönemeç Direnci.....	16
3.3. Motorlara ilişkin Moment ifadesi.....	16
3.3.1. Rotor Akımı	17
3.4. Manyetik Akı Fonksiyonu	19
3.4.1. En Küçük Kareler Yöntemiyle Uyarma Akısı Fonksiyonun belirlenmesi.....	19
3.4.2. En Küçük Kareler Yöntemiyle Endüvi Reaksiyonu Etkisine ilişkin Analitik Fonksiyonun Belirlenmesi.....	21
3.5. Sabit Tesislerin Modellenmesi.....	23
BÖLÜM 4. SİMÜLASYON FARK DENKLEMLERİNİN TÜRETİLMESİ	28
4.1. Lineer Bloklara ilişkin fark denklemlerinin türetilmesi.....	28
4.1.1. Entegrasyon Bloğuna ilişkin Fark Denklemlerinin Türetilmesi.....	28
4.1.2. Birinci Mertebeden Sistem Bloğuna ilişkin Fark Denklemlerinin Türetilmesi.....	29
4.1.3. İkinci Mertebeden Sistem Bloğuna ilişkin Fark denklemlerinin Türetilmesi	30
4.2. Lineer Olmayan Kısımlara ilişkin Fark Denklemlerinin Türetilmesi	33
4.2.1. Manyetik Akı Fonksiyonu	33
4.2.2. Sürtünme-Hava Direnci	34

4.2.3. Eğim Direnci	34
4.2.4. Dönemeç Direnci	34
4.3. Sisteme İlişkin Simülasyon Fark Denklemleri.	34
4.3.1. Rotor Akımına İlişkin Fark Denklemleri.....	35
 BÖLÜM 5. SIMÜLASYON PROGRAMI BLOK VE AKIŞ DİYAGRAMLARI..	39
5.1. Toplam Yük Direnci Modülü ve Fark Denklemleri.....	39
5.2. Tahrik Motorları Modülü ve Fark Denklemleri.	40
5.3. Filtre Modülü ve Fark Denklemleri	42
5.4. Sabit Tesislere İlişkin Program Bloğu ve Fark Denklemleri	44
 BÖLÜM 6. ENERJİ OPTİMİZASYONU	50
6.1. Faydalı Frenlemenin Yapılamadığı Durum	51
6.2. Faydalı Frenlemenin Yapıldığı Durum.....	53
6.3. Optimal Çözümlerin Bulunması	55
6.4. Optimal Çözümlerin Değerlendirilmesi	57
 BÖLÜM 7. SIMÜLASYON SONUÇLARI	59
7.1. Sistem Kontrolü.....	60
7.2. Çalışma Durumlarının Tanımlanması ve Simülasyon Sonuçları	61
7.3. Simülasyon Sonuçlarının İrdelenmesi	91
 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
 KAYNAKLAR.....	97
 EKLER	102
 ÖZGEÇMİŞ.....	110

ÖZET

Bu çalışmada, elektrikli ulaşım sistemlerinin analiz ve tasarımında kullanılmak üzere bir simülasyon programı geliştirilmiş, serbest uyarmalı doğru akım motor tahrikli İstanbul LRT sistemine uygulanmıştır. Bu programda, sisteme ilişkin bütün fiziksel kısıtlamalar göz önünde bulundurulmuş ve deneysel verilerden de yararlanarak sistemi tam olarak simüle eden bir bilgisayar programı elde edilmiştir. Simülasyon programında, ulaşım sistemindeki katener, yol profili, seyir direnci, tahrik motorları ve kontrol sistemini oluşturan kısımlar birbirinden bağımsız olarak ele alınmış ve modüler yapıda programlanmıştır.

Bu programın gerçekleştirilmesinde, sisteme ilişkin fark denklemleri modelinden yararlanılmıştır. Sistemin lineer ve lineer olmayan kısımları ayrı ayrı ele alınmış; lineer kısımlara ilişkin fark denklemleri z-tanım bölgesi transfer fonksiyonlarından türetilmiştir. Lineer olmayan kısımlara ilişkin fark denklemlerinin türetilmesinde, bu kısımlara ilişkin deneysel bağıntılardan yararlanılmıştır. Tahrik motoru olarak kullanılan serbest uyarmalı doğru akım motorunun manyetik akısı için, bu motora ilişkin mıknatıslanma eğrisinden alınan değerlerden hareketle, endüvi reaksiyonu etkisi de göz önünde bulundurularak, en küçük kareler yöntemiyle, manyetik akıya ilişkin bir fonksiyon türetilmiş ve fark denklemi biçiminde düzenlenmiştir. Sistemin fark denklemleri modeli kullanılarak, bilgisayarda programlanması kolay, hiç bir nümerik analiz yöntemi gerektirmeyen, daha doğru sonuç veren ve bütün örnekleme zamanları için kararlı bir yöntem geliştirilmiştir.

Bir elektrikli ulaşım aracının belirli bir yolu belirli bir zamanda minimum enerjiyle katetmesi için gerekli koşullar, faydalı frenlemenin yapıldığı ve yapılamadığı iki ayrı durum için, Kuhn-Tucker koşulları kullanılarak bulunmuş ve bu çözümlerin gerçekleştirilebilirliği tartışılmıştır.

Simülasyon programı, İstanbul LRT sisteminde, Ulubatlı-Sağmalcılar arasındaki bölgeye uygulanmış ve çeşitli çalışma durumlarına ilişkin simülasyon sonuçları verilmiş ve irdelenmiştir.

SUMMARY

MODELLING AND SIMULATION OF AN ELECTRICALLY DRIVEN TRANSPORT SYSTEM

Computer-aided system design tools are playing increasingly important roles in design and implementation of complex drive systems. These tools are becoming simple, economical to use, and more user-friendly day by day. A newly developed system, however it is complex, can be conveniently designed and simulated on a computer to verify the feasibility of the design parameters. The simulation approach is often time-saving, economical and possesses less risk of damage than the trial-and-error method design. However, it should be noted that the performance of a simulated system can be only as good as its model description, and therefore, working on the simulated system should be considered as a preliminary study of the system.

In recent years, computer simulation techniques have been applied to the railway systems. Those applications include railway engineering scheme, operation management and driver training.

In this study, a new simulation technique has been developed for traction drive systems and applied to Istanbul LRT (light rail transit) system which is driven by separately-excited D.C motors. z-transforms of the model is used directly in this new simulation technique. This technique makes the simulation method stable for all finite sampling period of T . Moreover, this method gives more accurate results and programming becomes much simpler.

The difference equations used in the simulation program are derived for linear and non-linear parts of the system. z-transform methods are used in deriving the difference equation for the linear parts of the system equation. For this purpose, a suitable sample and hold device is inserted to the transfer function of the system in s domain then the z-domain equivalents are found.

The difference equations are derived from the equations defined in z-transfer domain. It has been assumed that the parameters related to nonlinear and time varying parts are constant during one sampling period of T. These parameters are then used in the difference equation related to linear parts.

This study is divided into the following chapters

Chapter 1: Introduction

Chapter 2: System description (Rail transit systems)

Chapter 3: Modelling of the system

Chapter 4: Deriving the difference equation of the system

Chapter 5: Block and flow diagram of the simulation program

Chapter 6: Energy optimization

Chapter 7: Simulation results

In the first chapter, studies concerning the simulation of the rail transit systems are summarized and a review of the existing simulation methods are given.

A description of Istanbul rail transit systems which we have simulated is presented in chapter 2.

In chapter 3, various parts of overall LRT system are taken one by one, and dynamical or static equations, for each part are written in order to obtain the mathematical model of the system. In deriving a dynamical equation for a direct current motor one encounters a non-linear relation between magnetic flux and field current. Similarly, there is non-linear relation between armature current and the changes in the field flux due to armature reaction. For these cases, analytical functions have been derived by using least square approximation method with experimental data. Finally, the following equation which is valid in the operating region has been derived for the motor magnetic flux

$$\Phi(I_f, I_a) = \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot I_f}) - \Gamma \cdot I_a^{\delta}$$

where I_f is the field current and I_a is the armature current. Parameters $\xi, \beta, \Gamma, \delta$ are calculated by using Eureka package program. At the end of this chapter, modeling of D.C. traction substations and overhead catenary system have been done by using a circuit model. In this modelling, each train is represented by a current source and substations are represented by an equivalent circuit which consists of a voltage source and resistor in series.

In chapter 4, z-transform method has been directly applied for the linear system blocks. There exist actually three blocks for simulating linear parts of a system; namely, integration block, first-order system block and second-order system block. The following difference equation has been obtained by using a polygonal sample-and-hold device for the integration block:

$$y(k) = \frac{KT}{2} [x(k) + x(k-1)] + y(k-1)$$

The difference equation derived for the first-order system by using a zero-order sample-and-hold device is given below

$$y(k) = K \cdot (1 - e^{-T/\tau}) \cdot x(k-1) + e^{-T/\tau} \cdot y(k-1)$$

where $x(k)$ is input $y(k)$ is output, T is the sampling period, K is the gain, τ is the time constant of the system. Finally, the difference equation related to the last block, which is second-order system, has been derived in this chapter. It can be quite easily seen that this are very complicated equations.

The difference equations for non-linear parts which are derived are as follows:

The magnetic flux function:

$$\Phi(k) = \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot I_f(k)}) - \Gamma \cdot I_a^{\delta}(k)$$

The traction (rolling and aerodynamic) resistance (Davis' formula is used)

$$TRR(k) = k_0 + k_1 \cdot v(k) + k_2 \cdot v^2(k)$$

where k_0, k_1, k_2 are coefficients for train resistance

which depend on the class of track, car suspension system parameters and wheel type; and v is the speed.

The grade resistance is given as

$$TRS(k) = m \cdot g \cdot \sin(\alpha(k)) \approx m \cdot g \cdot \tan(\alpha(k)) = m \cdot g \cdot \frac{h(k)}{1000}$$

where m is total mass of the vehicle, g is acceleration of gravity and h is slope given in thousand percent.

Curve resistance (Mütznner's formula is used)

$$TRC(k) = m \cdot g \cdot \frac{C1 - C2 \cdot R(k)}{R(k) - C3}$$

where $C1$, $C2$, $C3$ are experimental coefficients and R is curve radius.

In chapter 5, block and flow diagrams of simulation programs are given. The simulation program consists of four main modules which are total traction resistance module, driving motors module, filters module and power substation module.

In chapter 6, the energy optimization topic has been covered related to rail transit systems. The necessary optimal conditions are derived for the energy consumption of a transit vehicle, travelling between given two stations having a distance of S , in a given fixed time t . It has been assumed that the transit vehicle travels with a constant acceleration and deceleration for energy optimization. Since the system equations are multidimensional and constraints appear to be in inequality type, solutions can only be found out using Kuhn-Tucker conditions given below

$$\nabla F(x^*) + \lambda \nabla h(x^*) + \mu \nabla g(x^*) = 0$$

$$\mu g(x^*) = 0, \quad \mu \geq 0$$

where

f is performance index or cost function,

g_j ($j=1,2,\dots,n$) < 0 are inequality constrains,

h_j ($j=1,2,\dots,m$) $= 0$ are equality constrains.

Energy consumption which has been taken as cost function has been derived for two different states:

Energy used without regeneration is derived as

$$E = \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_1^2 + \alpha_3 v_1^3 + \alpha_4 v_1 t_1 + \alpha_5 v_1^2 t_1 + \alpha_6 v_1^3 t_1$$

where v_1 is maximum speed, t_1 is acceleration time and $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$ are coefficients which are given as

$$\alpha_1 = k_0 t_2, \quad \alpha_2 = \frac{1}{2} m + k_1 t_2, \quad \alpha_3 = k_2 t_2$$

$$\alpha_4 = -\frac{k_0}{2}, \quad \alpha_5 = -\frac{2}{3} k_1, \quad \alpha_6 = -\frac{3}{4} k_2$$

Energy used with regeneration is derived as

$$E = -\frac{2}{3} k_1 v_1^2 t_1 + \frac{2}{3} k_1 v_1^2 t_2 + \frac{k_1}{3} t_3 v_1^2 - \frac{k_0}{2} v_1 t_1 + \frac{k_0}{2} v_1 t_2 + \frac{k_0}{2} t_3 v_1$$

where t_2 is start, t_3 is end of deceleration time.

At the first situation, equality and inequality constraints are as follows

$$h = S_1 - v_1 t_2 + \frac{1}{2} v_1 t_1 = 0$$

$$g = t_1 \geq 0$$

where S_1 is total track length.

The optimal solution has been found out to be:

$$v_1^* = \frac{S_1}{t_2}, \quad t_1^* = 0$$

At the second situation, equality and inequality constraints are given as:

$$h = 2S + v_1(t_1 - t_2 - t_3) = 0$$

$$g_1 = t_1 \geq 0$$

$$g_2 = t_2 - t_1 \geq 0$$

$$g_3 = t_3 - t_2 \geq 0$$

where S is total track length.

Then the optimal solution has been found out to be as follows:

$$t_1^*=0, \quad t_2^*=t_3, \quad v_1^*=\frac{S}{t_2}$$

Theoretically, both in acceleration and deceleration modes, energy consumption becomes minimum if the acceleration or deceleration is infinity. This can be seen from the solution of the Kuhn-Tucker equation. However, infinite acceleration or deceleration can not be achieved physically. Therefore, one has to apply a maximum acceleration or deceleration which is constrained by comfort, slip and power system.

In chapter 7, simulation programs have been applied to Istanbul LRT system and results have been represented as graphs of current, voltage and power of substations (rectifiers) and current, voltage and speed of trains. Six various situations have been examined. The cases are:

- 1) Running four trains each of which consists of three articulated-cars with track-paralleling at the same instant and two substations in service
- 2) Running four trains each of which consists of three articulated-cars with track-paralleling at the same instant and one substations in service
- 3) Running single-train consisting of three articulated-cars and one substation in service.
- 4) Running single-train consisting of three articulated-cars and one car is out of service.
- 5) Running single-train consisting of four articulated-cars and one substation in service.
- 6) Running single-train consisting of four articulated-cars, one substation in service and its voltage reduced to 700 V.

In all situations which have been simulated, it has been assumed that auxiliary load (electric heating system, lighting) has been in service. Finally, simulation results have also been evaluated and discussed in this chapter.

This program has the features of working as well the train performance simulator as the electric network simulator. For this reason, the program can be used in designing control algorithms for the drive motors of the train and it can also be used in generating control algorithms in energy optimization.



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Büyük ve karmaşık fiziksel sistemlerin analiz ve tasarımları, işlem kapasiteleri çok geniş ve hızlı bilgisayarların yaygınlaşması ile, sistem modelleri üzerinde yapılabilir hale gelmiştir. Bu amaçla türetilen modelin gerçeğe yakınlığı oranında sistem davranışı ile ilgili önemli bilgiler edinilmekte ve bu bilgilere dayanılarak tasarımlar yapılabilmektedir. Ulaşım sistemlerinde de simülasyon programları kullanılarak analiz ve tasarım yapılmaktadır. Bu şekilde gerçekleştirilen mühendislik hizmetleri "computer aided engineering (CAE)" veya "computer aided design (CAD)" olarak adlandırılır. Böylece büyük fiziksel sistemlerde daha hızlı, ucuz ve doğru analiz ve tasarım olanakları sağlanır. Bu sistemlerde yapılan analiz ve tasarımların başarısı simülasyon programı ile doğrudan ilgilidir. Karmaşık fiziksel sistemleri simüle eden bilgisayar programlarının olabildiğince gerçeğe yakın sonuçlar vermesi çok önemlidir.

Bir fiziksel sistemin simülasyon programının yazılabilmesi için, öncelikle sisteme ilişkin matematik modelin kurulması gerekir. Bu amaçla modeli bilinen fiziksel sistemi tanımlayan denklemler belirlenir, bu denklemleri çözen algoritmalar oluşturulur ve programlanır. Genel amaçlı simülasyon programları [1,2] genellikle modeli bilinen lineer sistemlerin analiz ve tasarımında kullanılır. Lineer olmayan sistemleri simüle eden simülasyon programları da vardır [3,4]. Bu tür programlar genel amaçlı olduklarından, büyük ve karmaşık fiziksel sistemleri tam olarak simüle edebilmek olanaksızdır. Büyük ve karmaşık sistemler için özel simülasyon programları gereklidir. Literatürde, simülasyon programlarına ilişkin bütün çalışmalar genel

nümerik analiz yöntemlerine dayanır. Bu nedenle simülasyon sonuçları, nümerik analiz yöntemlerinden kaynaklanan yöntem, kesme ve yuvarlatma hatalarını içerir. Simülasyon programlarında kullanılan nümerik analiz yöntemleri 4 grupta toplanabilir [5,6,7]. Bunlar: cebirsel denklem takımlarının çözümüne ilişkin, Gauss, Gauss-Jordan, Aitken, Gauss-Sidel ve LU çarpanlara ayırma gibi yöntemler; lineer olmayan denklemlerin çözümüne ilişkin, sabit nokta iterasyonu, Newton-Raphson, ikiye bölme, Müller, Bernoulli, Bairstow, Wegstein gibi yöntemler; sayısal entegrasyona ilişkin, Simpson, Romberg, Gauss entegrasyon, Lagrange enterpolasyon, sonlu farklar gibi yöntemler ve nihayet diferansiyel denklemlerin çözümüne ilişkin, Euler yöntemi, Runge-Kutta yöntemleri gibi Taylor serisine dayalı nümerik analiz yöntemleri, Adams-Bashforth, Adams-Moulton gibi polinomsal yaklaşıklık yöntemleri, Heun yöntemi, Milne yöntemi [8] gibi yüksek mertebeli çok adımlı yöntemlerdir.

1.1. Elektrikli ulaşım sistemleriyle ilgili yapılmış simülasyon programları

Elektrikli ulaşım sistemleriyle ilgili simülasyon programlarında da genel nümerik analiz yöntemleri kullanılır. Bir ulaşım sistemini bir bütün olarak simüle eden bir program mevcut değildir. Aşağıda bu konuda yapılan çalışmalar ve kullanılan nümerik yöntemler açıklanmıştır.

Güç besleme devresiyle ilgili simülasyon programları, elektrikli ulaşım sistemlerine ait besleme devresi modelinin bir nümerik analiz yöntemiyle çözümüne dayanır. Şebeke modelinde parametreler tren hareketine bağlı olarak değişir. Bu konuda yapılan bütün çalışmalarda, her adımda şebeke modelinde değişen parametreler hesaplanır ve devre denklemleri yeniden çözülür. Devre denklemlerinin çözümünde en çok "spare matrix" [9,10], ve Gauss-Sidel [11] yöntemleri kullanılır. İstanbul LRT sistemi için Birmingham

Üniversitesi Ulaştırma grubu tarafından hazırlanan bir şebeke simülasyon programında da [12] "spare Matrix" tekniği kullanılmıştır. Yukarıdaki çalışmalarda trene ilişkin parametrelerin belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmıştır. Örneğin Mellitt tarafından yapılan çalışmada [9]: çekme kuvveti, tren hızı ve kataner gerilimine bağlı olarak ifade edilmiş, hızlanma ve frenleme durumları için, parça-parça lineerleştirme yapılmıştır. Goodman tarafından yapılan çalışmada [10] trene ilişkin parametreler hıza indeksli bir tablodan (look-up table) alınmıştır.

Tahrik motoru sürücü devreleri ve harmonik analizine ilişkin yapılan simülasyon programları, t-tanım bölgesi simülasyon yöntemleriyle yapılan çalışmalarda, Fourier serisi açılımından yararlanılmıştır [13]. Başka bir çalışmada t-tanım bölgesi denklemleri lineer olmayan cebrik denklemlere dönüştürülerek Newton-Raphson yöntemiyle çözümler bulunmuştur [14]. Bu çalışmalar dışında durum uzayı modeli [15], transmisyon hattı modeli [16] ve "tensor matrix" tekniği [17] kullanarak gerçekleştirilen simülasyon programları da mevcuttur.

Tahrik motorlarının simülasyonunda genellikle çok adımlı nümerik yöntemlerden Adams-Bashford-Moulton yöntemi [18], t-tanım bölgesi simülasyon yöntemi [19] gibi yöntemler kullanılmıştır. Konuyla ilgili başka bir çalışmada, sisteme ilişkin denklemler uygun biçime getirilerek Simnon simülasyon programı ile inceleme yapılmıştır [20]. Doğru akım motor tahrikli bir ulaşım sisteminin modellenmesine ilişkin bir çalışmada [21], manyetik akı fonksiyonu uyarma akımına bağlı olarak modellenmiş fakat endüvi reaksiyonu etkisi göz önüne alınmamıştır.

1.2. Tren işletmesi ve enerji minimizasyonuna ilişkin çalışmalar

Tren işletmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda

kullanılan simülasyon programlarında genellikle deneysel bağıntılar ve datalar kullanılmış ve entegrasyon işlemi için Euler yöntemine başvurulmuştur [22].

Enerji optimizasyonuna ilişkin çalışmalarda: istasyonlar arasında sınır değerleri (ivme, patinaj) ve tarifeyi gerçekleyen tahrik enerjisini minumumlaştıran işletme koşulları aranır. Bu konuda: Bilgisayar kontrollu adaptif tarife belirleme [23], "dinamik akımsız çalışma kontrolü" (dynamic coast control) için "expert system" [24] gibi çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmalar dışında, bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilen, kataner sisteminin tasarımı [25], sinyalizasyon [26] ve mekanik olaylara ilişkin çalışmalar da vardır [27].

1.3. Çalışma konusunun amacı, yöntemi ve özellikleri

Bu çalışmanın amacı, hiç bir nümerik analiz yöntemi gerektirmeyen, kolay programlanabilir ve daha doğru sonuç veren bir sayısal simülasyon yöntemi geliştirmektir. Bu yöntem elektrikle tahrik, ulaşım sistemleri ve sayısal analiz literatüründe hiç kullanılmamış olan z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu ve bu fonksiyondan türetilen fark denklemleri kavramlarına dayanır. Sistemin lineer ve lineer olmayan kısımları ayrı ayrı ele alınır. Lineer kısımlar, bilgisayarda programlanması çok kolay olan fark denklemleri ile modellenir. Literatürde z-tanım bölgesinden hareketle gerçekleştirilen lineer sistemlerin simülasyonuna ilişkin yöntemler bulunmaktadır [28,29,30]. Kuo tarafından verilen sayısal simülasyona ilişkin yöntemde [28]: sisteme ilişkin s-tanım bölgesi transfer fonksiyonu, sıfırdan itibaren tutucu veya poligonal tutucunun s-tanım bölgesi transfer fonksiyonu ile çarpılır, z-dönüşümü alınır ve bu ifadenin seriye açılımından yararlanılarak sayısal simülasyon gerçekleştirilir. Bu yöntem seriye açma işleminden kaynaklanan

hataları içerir. Sisteme ilişkin ayrık durum uzayı modelinden yararlanılarak gerçekleştirilen sayısal simülasyon yönteminde [29] ayrık matrisin elde edilmesinde örnekleme zamanına bağlı hatalar, Euler, geriye farklar, Tustin yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal simülasyon yöntemlerinde de [30] yaklaşım hataları bulunur. Ayrıca bu yöntemlerden doğru sonuç alabilmek için örnekleme zamanının uygun seçilmesi gerekir.

Çalışmamızda, yukarıda değinilen nümerik analiz ve z-tanım bölgesi sayısal simülasyon yöntemlerinden daha iyi sonuç veren ve örnekleme zamanlarının bütün değerleri için geçerli olan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, s-tanım bölgesi transfer fonksiyonu verilebilen bütün sistemlere uygulanabilir. Yöntemin temel ilkesi şu şekilde özetlenebilir: birinci ve ikinci mertebeden sistemlere ilişkin s-tanım bölgesi transfer fonksiyonları uygun bir tutucu transfer fonksiyonu ile çarpılır, z-dönüşümü alınır ve bu dönüşümden fark denklemleri türetilir. Burada gerekli olan kök bulma çarpanlara ayırma gibi işlemler analitik olarak gerçekleştirir. Çarpanlara ayırma Jury tarafından verilen direkt z-dönüşümü tablosuna uygun bir biçimde yapılır [31]. Serbest uyarmalı doğru akım motor tahrikli bir ulaşım sisteminin lineer kısımlarına ilişkin fark denklemleri bu şekilde türetilmiştir. Bu yöntemle dördüncü mertebeden sistemlere kadar analitik olarak çözüm elde edilebilir [32]. Ayrıca son yıllarda geliştirilen bir matematik paket programı ile analitik olarak yüksek mertebeden ifadeleri her zaman çarpanlara ayırmak mümkündür [33]. Böylece yüksek mertebeden sistemler, birinci ve ikinci mertebeden sistemlere ayrılarak bu yöntemle incelenebilir.

Bu çalışmada, elektrikle ulaşım sistemlerine ilişkin tahrik düzenleri kısaca tanıtıldıktan sonra (bölüm 2), serbest uyarmalı doğru akım motor tahrikli bir ulaşım sisteminin matematiksel modeli verilmiştir (bölüm 3). Bu bölümde

endüvi reaksiyonu etkisi de göz önüne alınarak tahrik motoru için tam bir matematiksel model elde edilmesi amaçlanmıştır. Konuyla ilgili yapılan bir çalışmada [21] manyetik akı fonksiyonu uyarma akımına bağlı olarak modellenmiş fakat endüvi reaksiyonu etkisi göz önüne alınmamıştır. Endüvi reaksiyonu etkisinin göz önüne alınmaması, simülasyon sonuçlarında, manyetik akı fonksiyonunda %20' lere varan hatalara neden olur. Buna bağlı olarak tahrik motoru rotor akımı ve motor hızında yanlış sonuçlar elde edilir.

Birinci ve ikinci mertebeden sistemlere ilişkin fark denklemleri, 4.bölümde türetilmiş ve bu denklemler, sistem modelinde, hareket denklemi, rotor akımı ve güç filtresi gibi lineer kısımlara uygulanmıştır. Lineer olmayan kısımlara ilişkin fark denklemleri, bu kısımlara ilişkin analitik ifadeler türetilerek değerlendirilmiştir. Toplam seyir direnci direnci, tahrik motorları, filtre ve sabit tesislere ilişkin blok ve akış diyagramları ve bu kısımlar için türetilen fark denklemleri, vagon konumlarına bağlı olarak değişen ray ve hat iletkenliklerine ilişkin ifadeler bölüm 5'de verilmiştir.

Serbest uyarmalı doğru akım motor tahrikli bir ulaşım sistemi için elde edilen fark denklemleri işlem sırasına göre yazılarak kolayca programlanabilir. Bu iş için her hangi bir nümerik analiz yöntemine gerek yoktur. Simülasyon programı, fark denklemlerinin analitik olarak elde edilmesi nedeniyle, diğer yöntemlere göre, her örnekleme zamanı için daha doğru sonuçlar verir. Hızlı değişen olayları görmek için T örnekleme zamanı küçük, yavaş değişen olayları görmek için T örnekleme zamanı büyük seçilir. Her iki durumda da, sonlu giriş ve örnekleme zamanları için, yöntem sonuçları kararlıdır.

Serbest uyarmalı doğru akım motor tahrikli bir ulaşım sistemi için geliştirilen bu simülasyon programı,tahrik

motorlarına ilişkin fark denklemleri değiştirilerek her türlü ulaşım sistemine uygulanabilir. Simülasyon programı modüler yapıdadır. Ayrıca fark denklemlerinin z-tanım bölgesi transfer fonksiyonlarından elde edilmesi sayısal simülasyon yönteminin kararlılık incelenmesi için avantaj sağlar.

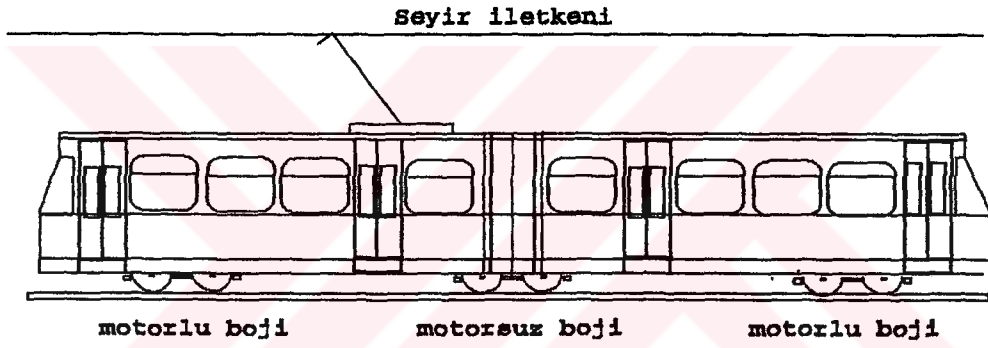
Tahrik enerjisinin optimizasyonu için gerekli koşullar, bölüm 6'da matematiksel olarak elde edilmiştir. Literatürde, enerji optimizasyonuna ilişkin matematiksel bir gösterim bulunmamaktadır. Enerji optimizasyonu için gerekli hız ve ivme değerleri enerji ifadesinden hareketle geometrik olarak açıklanmıştır [23,34]. Bu bölümde, iki istasyon arasında belirli bir S yolunu belirli bir t zamanında kateden bir ulaşım aracının minimum enerji harcaması için gerekli koşullar Kuhn-Tucker ilişkileri [35,36] kullanılarak bulunmuş ve bulunan optimal çözümlerin uygulanabilirliği tartışılmıştır.

Geliştirilen simülasyon programı sonuçları, bölüm 7'de yapımcı firma ABB tarafından verilen tasarım değerleri ile karşılaştırılmış, çeşitli kısımlara ilişkin simülasyon sonuçları elde edilmiş ve tartışılmıştır. Bu bölümde ayrıca sistemin kontrolü için yazılan PID algoritmaları da denenmiş, hızlanma, frenleme zamanları çeşitli yük ve yol durumları için katanerden çekilen akımlara ilişkin diyagramlar da verilmiştir.

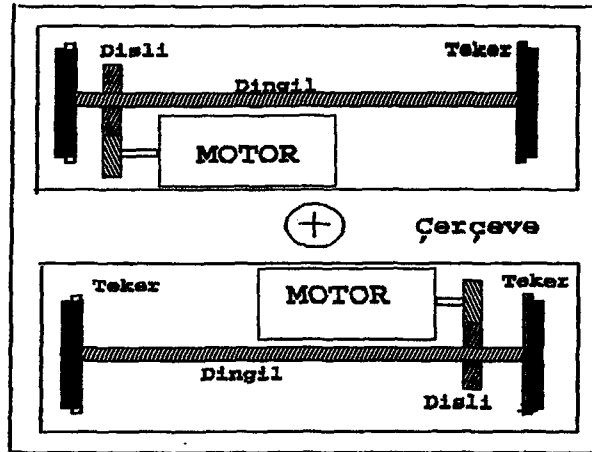
BÖLÜM 2

SİSTEMİN TANITILMASI

İstanbul LRT sisteminde tahrik motoru olarak serbest uyarmalı doğru akım motoru kullanılmaktadır. Her vagona (Şekil 2-1) ikisi tahrikli (motorlu) biri tahriksiz (motorsuz) 3 boji bulunmaktadır. Bunlardan 1 ve 3 nolu bojiler motorlu 2 nolu boji ise motorsuzdur.

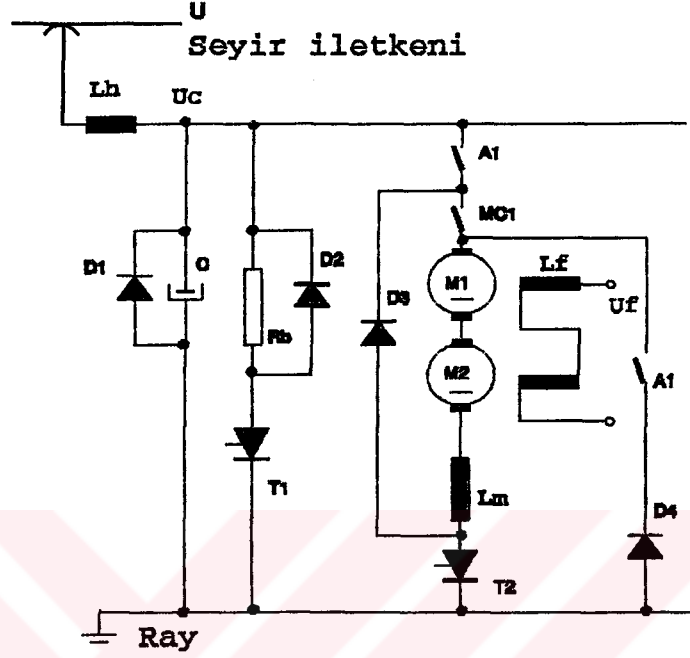


Şekil 2-1: Vagon



Şekil 2-2: Boji ve tahrik motorları

Her boji (arabacık) 2 dingilden oluşmakta (şekil 2-2) ve her dingil (teker takımı) bir motorla tahrik edilmektedir.

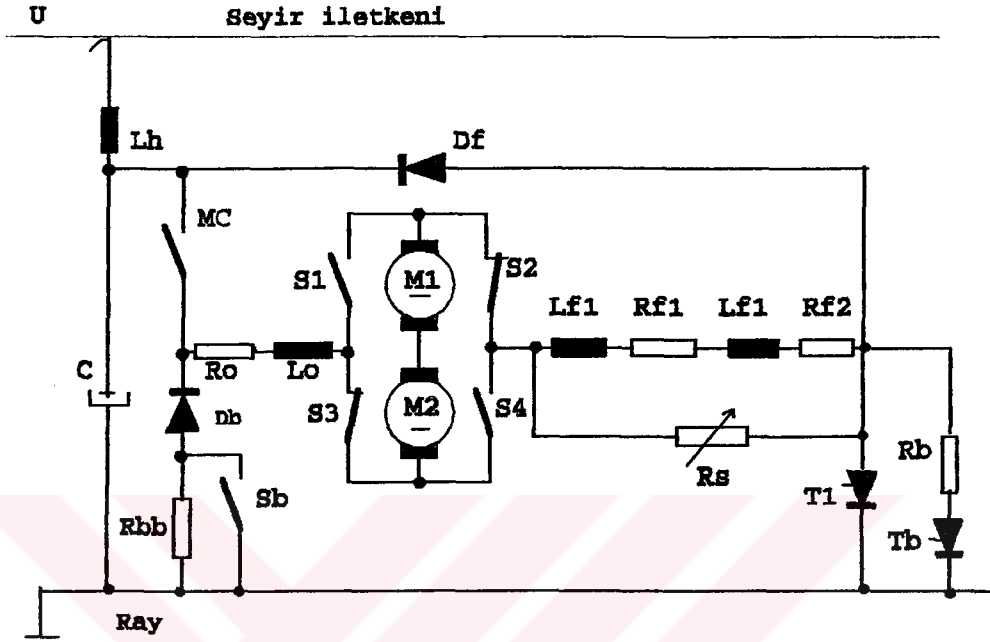


Şekil 2-3: D. A. serbest uyarmalı motor tahrikli bir ulaşım taşıtının bir teker takımına ait güç devresi

- Lh : Hat akımı süzme endüktansı
- D1,D2 : Serbest geçiş diyotları
- D3,D4 : Serbest geçiş ve frenleme diyotları
- C : Filtre kondansatörü
- Rb : Aşırı gerilim direnci
- T1 : Fren kıyıcısı (GTO tristörü)
- T2 : Motor kıyıcısı (GTO tristörü)
- Lm : Motor akımı süzme endüktansı
- A1 : Ana kontaktör
- MC1 : Motor çalışma kontaktörü
- M1,M2 : Serbest uyarmalı doğru akım motorları
- Lf : Uyarma devresi endüktansı

Motorlu bojilerde motorların endüvi ve uyarma devreleri elektriksel olarak seri bağlıdır (şekil 2-3).

Doğru akım seri motorları da ulaşım sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Böyle bir sisteme ilişkin güç devresi şekil 2-5'de verilmiştir.



Şekil 2-5: Doğru akım seri motorlu güç devresi

Lh	: Hat akımı süzme endüktansı
C	: Filtre kondansatörü
Lo,Ro	: Motor akımı süzme endüktansı ve direnci
Rb	: Fren direnci
Rbb	: Aşırı gerilim fren direnci
Rs	: Şöntleme direnci
Df,Db	: Serbest geçiş ve frenleme diyotları
S1,S2,S3,S4	: Motor ve fren çalışma anahtarları
MC	: Motor çalışma kontaktörü
T1	: Motor akımı kontrol kıyıcısı
Tb	: Fren çalışma kıyıcısı
Sb	: Fren çalışma anahtarı
Rf,Lf	: Uyarma devresi direnç ve endüktansı
M1,M2	: Seri uyarmalı doğru akım motorları

Sistemin çalışması: Motor çalışma modunda S2 ve S3

kapalı durumda iken (bir hareket yönü için) MC kontaktörü kapanır. T1 kıyıcısı ile motor ve uyarma akımı ayarlanarak sistem hızlanır. Rs şöntleme direnci ile uyarma akımı ayarlanarak yüksek hızlara çıkılması sağlanır. Frenleme modunda MC kontaktörü S2 ve S3 anahtarları açılır, S1 ve S4 anahtarları kapanır. T1 kıyıcısı ile motor akımı ayarlanarak frenleme işlemi yapılır. T1 kıyıcısı iletimde iken motor akımı, Db diyodu Rb direnci ve kendi devresi üzerinden; T1 kıyıcısı kesimde iken motor akımı Df diyodu üzerinden faydalı enerji olarak şebekeye iade edilir. Şebekede alıcı olmaması durumunda filtre kondansatörü gerilimi yükselir, filtre gerilimi belirli bir değeri aşınca Tb kıyıcısı iletime geçerek, üretilen enerjinin Rb direnci üzerinde harcanması sağlanır.

Sürücü devreler ve bilgisayarlı kontrol düzenlerinin gelişmesi sonucu son yıllarda ulaşım sistemlerinde, kısa devre asenkron motorlarının kullanımı gündeme gelmiştir. Bu konuda yoğun çalışmalar sürmektedir. Asenkron motorların karakteristikleri ulaşım sistemine uygun bir biçime getirilerek bu motorların işletme üstünlüklerinden yararlanmak istenmektedir. Çalışmamızda asenkron motorlu ulaşım sistemleri incelenmemiştir. Ancak kullanılan yöntem, doğru akım seri ve asenkron motor tahrikli sistemlere uygulanabilir.

p[.] : kütle arttırma katsayısı

$v[m/s]$: taşıt hızı
 $Z[N]$: toplam taşıt çekme (cer) kuvveti
 $TR[N]$: toplam seyir direncidir.

3.2.1. Kütle Arttırma Katsayısı

Kütle arttırma katsayısı p , taşıttaki dönen kütlelerin öteleme hareketine olan etkisini belirtir. Bu etki enerji bilançosundan türetilir. Taşıt kinetik enerjisine ilişkin genel ifade yazılırsa

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}\sum J\omega^2 = \frac{1}{2}mv^2 \left(1 + \frac{\sum J\omega^2}{mv^2}\right) = \frac{1}{2}mv^2 (1+p) \quad (3.2)$$

p kütle arttırma katsayısı

$$p = \frac{\sum J\omega^2}{mv^2} \quad (3.3)$$

olarak tanımlanır [38]. Burada,
 $J[kgm^2]$: dönen kütlelerin teker miline indirgenmiş toplam atalet momenti
 $w[rad/s]$: teker açısal hızıdır.

3.2.2. Toplam Taşıt Çekme Kuvveti

Toplam taşıt çekme kuvveti Z , iki bojide bulunan 4 motor tarafından üretilir. Bir bojideki birinci ve ikinci dingillere ilişkin çekme kuvvetleri, M_{11}, M_{12} motor momentleri olmak üzere

$$Z_1 = M_{11} \cdot \frac{2}{D_1} \cdot \delta \cdot \eta_d \quad Z_2 = M_{12} \cdot \frac{2}{D_2} \cdot \delta \cdot \eta_d \quad \left(\frac{dv}{dt} \geq 0\right) \quad (3.4)$$

biçiminde ifade edilir [39]. Motorların uyarma ve rotor akımlarının eşit olması nedeniyle ürettikleri momentlerde eşittir. Teker çaplarında eşit olması halinde çekme kuvvetleri $Z_1 = Z_2$ dir. Tekerlerden birinin daha fazla aşınması durumunda, çapı küçülen tekerde daha büyük bir çekme kuvveti oluşacaktır. Bu çekme kuvveti belirli bir değeri aşınca patınaja neden olur. Dingil başına maksimum olarak faydalanan çekme kuvveti, μ sürtünme katsayısı,

$N[N]$ dingil basıncı olmak üzere $Z_1 = \mu N$ dir. Patinaj olmaması için $Z_1 \leq \mu \cdot N$ koşulunun sağlanması gerekir [40]. Ön ve arka bojilerde teker çaplarının eşit olması ve aynı yükün paylaşılması durumunda bir vagonda üretilen toplam çekme kuvveti

$$M = M_{m1} = M_{m2} , \quad D = D_1 = D_2 , \quad Z_1 = Z_2$$
$$Z = 4 \cdot Z_1 = \begin{cases} M \cdot \frac{8}{D} \cdot \dot{u} \cdot \eta_d & \left(\frac{dv}{dt} \geq 0 \right) \\ M \cdot \frac{8}{D \cdot \eta_d} \cdot \dot{u} & \left(\frac{dv}{dt} < 0 \right) \end{cases} \quad (3.5)$$

biçiminde ifade edilir.

3.2.3. Toplam Seyir Direnci

Bir vagona ilişkin toplam seyir direnci (TR) sürtünme-hava (TRR), eğim (TRS) ve eğrilik (dönemeç) (TRC) dirençlerinin toplamından oluşur. Aşağıda bu dirençlere ilişkin ifadeler verilmiştir.

3.2.3.1. Sürtünme-hava Direnci (TRR)

Sürtünme-hava direncine ilişkin çok sayıda deneysel bağıntı bulunmaktadır [34,38,40,41]. Simülasyon programında sürtünme-hava direnci için Davis Formülü kullanılmıştır. Bu bağıntı,

$$\begin{aligned} k_0 &= (a \cdot W \cdot n + b \cdot n) \cdot 9,81 \\ k_1 &= 9,81 \cdot c \cdot W \cdot n \\ k_2 &= d \cdot A \cdot 9,81 \end{aligned} \quad (3.6)$$

olmak üzere

$$TRR = k_0 + k_1 \cdot v + k_2 \cdot v^2 \quad (3.7)$$

biçiminde ifade edilir [42]. Burada,
 $a[.] = 0,65$, $b[.] = 13,2$, $c[.] = 0,00931$, $d[.] = 0,00453$,
deneysel katsayılar,
 $W[\text{ton}]$: dingil yükü,

n[.] : dingil sayısı,
v[km/h]: vagon hızı,
A[m²] : eşdeğer taşıt alanı yüzeyidir

3.2.3.2. Eğim Direnci (TRS)

Eğim direnci TRS[N],

$$TRS=m.g.\sin(\alpha) \approx m.g.\tan(\alpha) = m.g. \frac{h}{1000} \quad (3.8)$$

ilişkisinden belirlenir. Burada,
m[kg] : toplam taşıt kütlesi,
g[m/s²] : yer çekimi ivmesi,
α[.] : yol eğim açısı,
h[m] : bin metrede seviye farkı

3.2.3.3. Dönemeç (eğrilik) Direnci (TRC):

Dönemeç direnci için bir çok deneysel formül bulunmaktadır (Launhardt, Röckle, Mützner vs.) [34]. Simülasyon programında, Mützner'in formülü kullanılmıştır. Bu formüle göre 1435 mm raylararası mesafe için dönemeç direnci TRC[N]

$$TRC=m.g. \frac{C1-C2.R}{R-C3} \quad \{ 50 < R[m] < 2000 \} \quad (3.9)$$

deneysel bağıntısı ile verilir. Burada,

R[m] : dönemeç (eğrilik) yarıçapı,
C1[.] = 800, C2[.] = 0,4, C3[.] = 40 değerlerinde deneysel katsayılarıdır.

3.3. Motorlara ilişkin Moment ifadesi

Tahrik motorlarına ilişkin iç moment ifadeleri

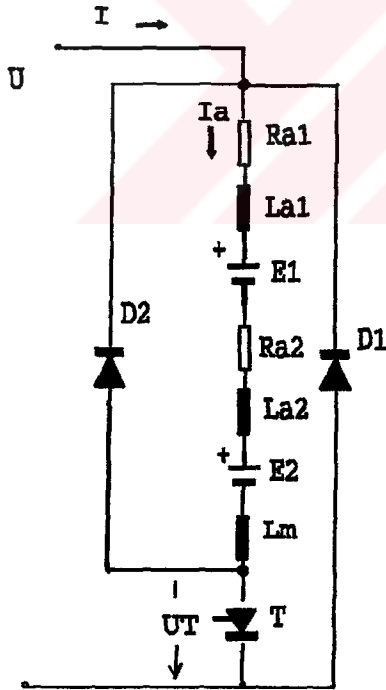
$$M_m = k_m \cdot \Phi \cdot I_a \quad (3.10)$$

biçimindedir [43,44]. Burada,

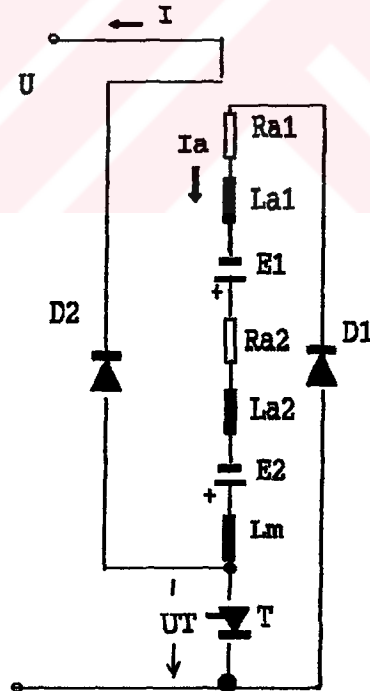
$k_m[.]$ = motor moment katsayısı,
 $\Phi[V.s]$ = manyetik akı,
 $I_a[A]$ = rotor akımıdır.

3.3.1 Rotor Akımı

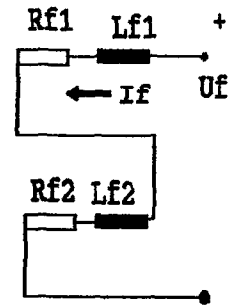
Rotor akımına ilişkin devre denklemleri, şekil 3-2a, şekil 3-2b' de verilen eşdeğer devre modellerinden hareketle yazılabilir. Eşdeğer devre, motor çalışma modunda şekil 3-2a, fren çalışma modunda şekil 3-2b biçimindedir. Şekil 3-2c'de uyarma devresine ilişkin eşdeğer devre verilmiştir.



Şekil 3-2a



Şekil 3-2b



Şekil 3-2c

Devre denklemleri T tristörünün iletimde ve kesimde olması durumuna göre farklı biçimlerde olacaktır. Tristör ve diyot elemanlarının ideal anahtar olarak davrandığı

varsayılarak devre denklemleri

$$\begin{aligned}\Sigma L &= L_{a1} + L_{a2} + L_m \\ \Sigma R &= R_{a1} + R_{a2} \\ \Sigma e(t) &= e_1(t) + e_2(t)\end{aligned}\tag{3.11}$$

olmak üzere, motor çalışmada T tristörünün iletimde olması durumunda

$$u(t) = \Sigma R \cdot i_a(t) + \Sigma L \frac{di_a(t)}{dt} + \Sigma e(t) + 2 \cdot \Delta u \tag{3.12}$$

T tristörünün kesimde olması durumunda

$$0 = \Sigma R \cdot i_a(t) + \Sigma L \frac{di_a(t)}{dt} + \Sigma e(t) + 2 \cdot \Delta u \tag{3.13}$$

Fren çalışma modunda T tristörünün iletimde olması durumunda

$$\Sigma e(t) = \Sigma R \cdot i_a(t) + \Sigma L \frac{di_a(t)}{dt} + 2 \cdot \Delta u \tag{3.14}$$

T tristörünün kesimde olması durumunda

$$\Sigma e(t) - u(t) = \Sigma R \cdot i_a(t) + \Sigma L \frac{di_a(t)}{dt} + 2 \cdot \Delta u \tag{3.15}$$

biçiminde yazılabilir [45].

Burada Δu fırçalardaki toplam gerilim düşümüdür.

Motorlara ilişkin zıt EMK ifadeleri

$$\begin{aligned}e_1(t) &= k_{ev} \Phi(t) \omega_1(t) = k_e \Phi(t) n(t) \\ e_2(t) &= k_{ev} \Phi(t) \omega_2(t) = k_e \Phi(t) n(t)\end{aligned}\tag{3.16}$$

biçiminde ifade edilir [43]. Burada, $k_{ev} = k_1$ ve k_e motor sabitleridir.

Motor uyarma devresine ilişkin devre denklemi ise (şekil 3-2c)

$$u_f(t) = (L_{f1} + L_{f2}) \frac{di_f(t)}{dt} + (R_{f1} + R_{f2}) i_f(t) \quad (3.17)$$

biçimindedir.

3.4. Manyetik Akı Fonksiyonu

Bilindiği gibi manyetik akı ile uyarma akımı arasında analitik bir ilişki yoktur. Ayrıca doğru akım motorlarının modellenmesinde genellikle endüvi reaksiyonu etkisi göz önünde bulundurulmaz. Simülasyon programının olabildiğince doğru sonuç vermesi için manyetik akı ile uyarma akımı ve rotor akımı arasındaki ilişkinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla en küçük kareler yöntemiyle uyarma akımı ile manyetik akı arasında analitik bir fonksiyon türetilmiştir. Ayrıca faydalı manyetik akının azalmasına neden olan endüvi reaksiyonu etkisi için rotor akımı ile manyetik akı arasında bir analitik fonksiyon da türetilmiştir.

3.4.1. En Küçük Kareler Yöntemiyle Uyarma Akısı Fonksiyonunun Belirlenmesi

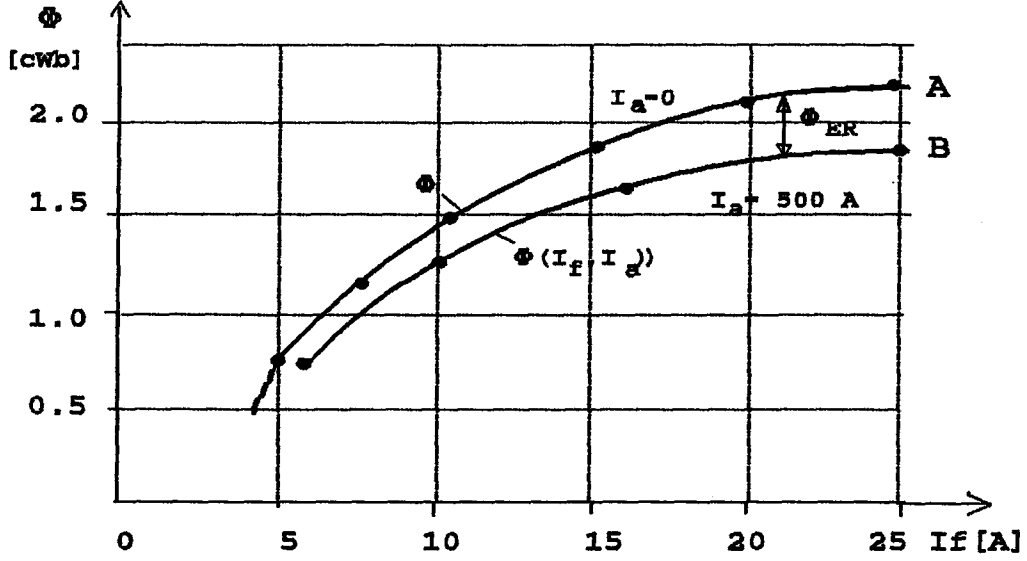
Sistemde tahrik motoru olarak kullanılan, serbest uyarmalı doğru akım motorunun mıknatıslanma eğrisinden, uyarma akımının her değerine karşı düşen manyetik akı değerleri okunarak, manyetik akı ile uyarma akımı arasındaki ilişkiyi veren bir analitik fonksiyonun belirlenmesi gerekir.

Bu amaçla motor mıknatıslanma eğrisinden (şekil 3-3) rotor akımı

$I_a=0$ için

$$\begin{aligned} I_f &= [i_1, i_2, \dots, i_n] \\ \Phi &= [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n] \end{aligned} \quad (3.18)$$

değerleri alınır. Alınan bu değerlerden akı fonksiyonun



Şekil 3-3: Motor mıknatıslanma eğrisi

$$\phi = \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot I}) \quad (3.19)$$

biçiminde değiştiği göz önünde bulundurularak, bu fonksiyon ile mıknatıslanma eğrisinden alınan değerler arasındaki sapmayı minimum yapan ξ ve β parametreleri aranır.

Sapma değerleri

$$\begin{aligned} d_1 &= \phi_1 - \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot I_1}) \\ d_2 &= \phi_2 - \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot I_2}) \\ &\dots\dots\dots \\ d_n &= \phi_n - \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot I_n}) \end{aligned} \quad (3.20)$$

biçiminde tanımlanırsa, bu değerlerin kareleri toplamı

$$A = \sum_{k=1}^n [\phi_k - \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot I_k})]^2 \quad (3.21)$$

biçiminde yazılabilir [46]. Bu ifadeyi minimum yapan ξ ve β değerleri

$$\frac{\partial A}{\partial \xi} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \xi} [\varphi_k - \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot i_k})]^2 = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial A}{\partial \beta} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \beta} [\varphi_k - \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot i_k})]^2 = 0$$

denklemlerinin çözümünden elde edilir. Bu denklemlerde kısmi türevler alınır ve gerekli işlemler yapılırsa

$$\sum_{k=1}^n 2[-\varphi_k + \varphi_k \cdot e^{-\beta \cdot i_k} + \xi \cdot 2 \cdot e^{-\beta \cdot i_k} + \xi \cdot e^{-2 \cdot \beta \cdot i_k}] = 0 \quad (3.23)$$

$$\sum_{k=1}^n 2 \cdot \xi \cdot i_k \cdot [-\varphi_k \cdot e^{-\beta \cdot i_k} + \xi \cdot e^{-\beta \cdot i_k} - \xi \cdot e^{-2 \cdot \beta \cdot i_k}] = 0$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerin çözümü karesel sapmayı minimum yapan ξ ve β parametrelerini verir.

3.4.2. En Küçük Kareler Yöntemiyle Endüvi Reaksiyonu Etkisine İlişkin Analitik Fonksiyonun Belirlenmesi

Mıknatıslanma eğrisinden (şekil 3-3), uyarma akımının $I_f=22$ A sabit değerinde, rotor akımı ile manyetik akıdaki zayıflamaya ilişkin

$$I_a = [i_1, i_2, \dots, i_n] \quad (3.24)$$

$$\Phi_{ER} = [\varphi_{ER1}, \varphi_{ER2}, \dots, \varphi_{ERn}]$$

değerlerden, endüvi reaksiyonu etkisinin

$$\Phi_{ER} = \Gamma \cdot I_a^\delta \quad (3.25)$$

biçiminde değiştiği görülür. Bu fonksiyon ile mıknatıslanma eğrisinden alınan manyetik akıdaki zayıflamaya ilişkin değerler arasındaki sapmayı minimum yapan Γ ve δ parametreleri

$$B = \sum_{k=1}^n [(\varphi_{ER})_k - \Gamma \cdot (I_a)_k^\delta]^2 \quad (3.26)$$

olmak üzere,

$$\begin{aligned}\frac{\partial B}{\partial \Gamma} &= \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \Gamma} [(\Phi_{BR})_k - \Gamma \cdot (I_a)_k^{\delta}]^2 = 0 \\ \frac{\partial B}{\partial \delta} &= \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \delta} [(\Phi_{BR})_k - \Gamma \cdot (I_a)_k^{\delta}]^2 = 0\end{aligned}\quad (3.27)$$

denklemlerinin çözümünden elde edilir. Bu denklemlerde kısmi türevler alınır ve gerekli işlemler yapılırsa

$$\frac{\partial B}{\partial \Gamma} = \sum_{k=1}^n [-2 \cdot (\Phi_{BR})_k \cdot (I_a)_k^{\delta} + 2 \cdot \Gamma \cdot (I_a)_k^{2 \cdot \delta}] = 0 \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial B}{\partial \delta} = \sum_{k=1}^n [-2 \cdot (\Phi_{BR})_k \cdot \Gamma \cdot (I_a)_k^{\delta} \cdot \ln(I_a)_k + 2 \cdot \Gamma^2 \cdot (I_a)_k^{2 \cdot \delta} \cdot \ln(I_a)_k] = 0$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerin çözümü karesel sapmayı minimum yapan Γ ve δ değerlerini verir. Elde edilen bu değerlerin uyarma akımının çalışma bölgesindeki diğer değerleri içinde oldukça yeterli sonuç verdiği görülmüştür (Ek A). Sonuç olarak, motor manyetik akısı (3.19) ve (3.25) denklemleri birleştirilerek

$$\Phi(I_f, I_a) = \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot I_f}) - \Gamma \cdot I_a^{\delta} \quad (3.29)$$

biçiminde modellenir. İstanbul LRT sisteminde kullanılmış bulunan tahrik motorlarına ait, yapımcı firmanın verdiği mıknatıslanma eğrisinden çıkarılan tablo 3-1' deki değerler [47]. alınarak (3.29) denklemindeki ξ , β , Γ , δ parametreleri, bilgisayarda Eureka paket programı kullanılarak [48] $0 < I_a [A] < 500$, $I_f = 22$ A için

$$\xi = 2.59427, \quad \beta = 0.08563, \quad \Gamma = 0.000021, \quad \delta = 1.534537 \quad (3.30)$$

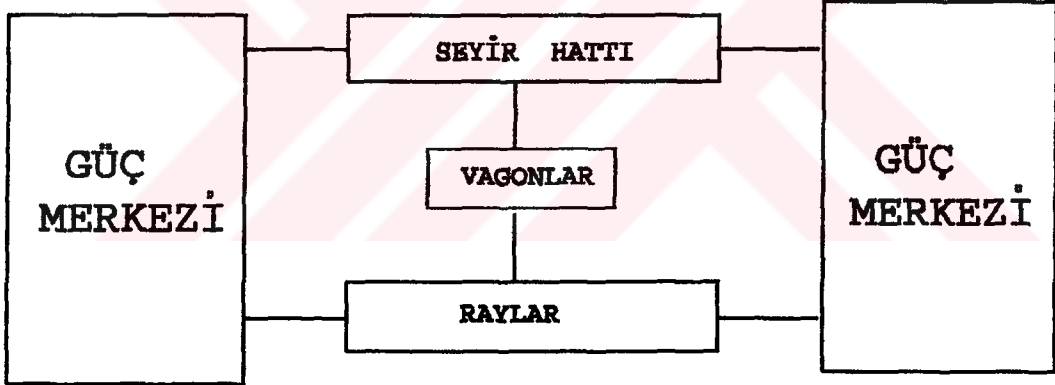
olarak bulunmuştur. Simülasyon programında bu değerler kullanılmıştır. Teorik olarak, endüvi reaksiyonuna ilişkin Γ katsayısı uyarma akımına bağlıdır. Fakat uyarma akımının çalışma bölgesindeki diğer değerleri için de bu katsayıya yakın değerler bulunmuştur (Ek B).

Tablo 3-1: Mıknatıslanma eğrisinden alınan değerler

$I_a = 0$		$I_f = 22$ A	
$I_a [A]$	$\Phi [cwb]$	$I_a [A]$	$\Phi_m [cwb]$
5	0.8	50	0.01
10	1.6	100	0.015
15	1.87	200	0.05
20	2.1	280	0.12
22	2.2	400	0.20
25	2.25	500	0.30

3.5.Sabit Tesislerin Modellenmesi

Sabit tesisler güç merkezleri,seyir hatları ve raylardan oluşur. Modelleme fiziksel yapıya uygun olarak ele alınır. Birbirini izleyen iki güç merkezi arasında (şekil 3-4) seyir hattı, raylar ve vagon bulunur. Güç merkezleri ideal bir gerilim kaynağı ve kaynağın iç direncini sembolize eden bir R_k seri direnci ile modellenir. İki güç merkezi arasında birbirine paralel bağlı (gidiş ve dönüş yolu) seyir iletkenleri ve rayları bulunur. Geçici olaylar göz önünde bulundurulmadığından devre modeli sadece dirençlerden oluşur. Bu dirençlerin değeri vagonların konumuna göre değişir. Vagonlar birer ideal akım kaynağı ile modellenmiştir. Sabit tesislere ilişkin devre modeli şekil 3-5'de verilmiştir.

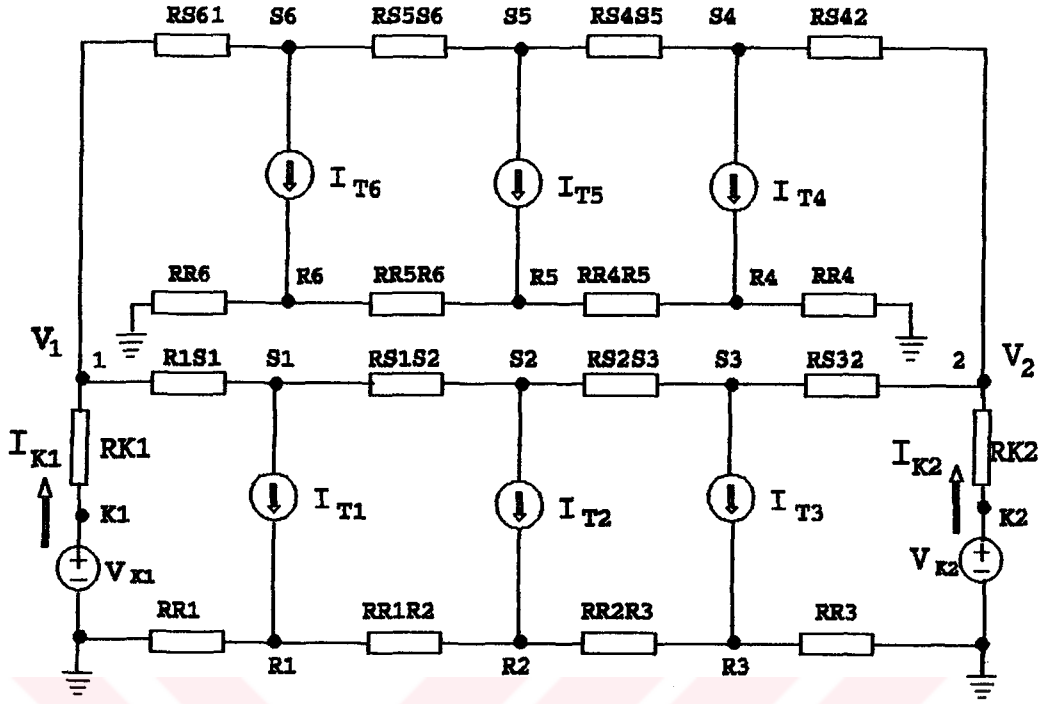


Şekil 3-4:Sabit tesislere ilişkin blok diyagramı

Şekil 3-5'de verilen devre modeline, genelleştirilmiş düğüm denklemleri yöntemi uygulanırsa, devre denklemleri

$$[A] \cdot [x] = [b] \quad (3.31)$$

biçiminde yazılabilir [49].



Şekil 3-5: Sabit tesislere ilişkin devre modeli

Bu denklemler $[x]$ ve $[b]$ vektörleri,

I_{K1}, I_{K2} : Kaynaklardan çekilen akımlar,

V_1, V_2 : 1 ve 2 düğümlerine ilişkin düğüm gerilimleri,

$V_{S1}, V_{S2}, \dots, V_{S6}$: $S_1, S_2, \dots, S_6$ düğümlerine ilişkin düğüm gerilimleri,

$V_{R1}, V_{R2}, \dots, V_{R6}$: $R_1, R_2, \dots, R_6$ düğümlerine ilişkin düğüm gerilimleri,

V_{K1}, V_{K2} : Güç merkezleri kaynak gerilimleri

$I_{T1}, I_{T2}, \dots, I_{T6}$: 1, 2, ..., 6 düğümlerinden çekilen vagon akımları olmak üzere

$$[x]^T = [I_{K1}, I_{K2}, V_1, V_2, V_{S1}, V_{S2}, \dots, V_{S6}, V_{R1}, V_{R2}, V_{R3}, \dots, V_{R6}] \quad (3.32)$$

$$[b]^T = [V_{K1}, V_{K2}, V_{K1}, V_{K2}, -I_{T1}, -I_{T2}, \dots, -I_{T6}, I_{T1}, I_{T2}, \dots, I_{T6}] \quad (3.33)$$

biçiminde olacak şekilde düzenlenirse $[A]$ matrisi

$$[A] = \begin{bmatrix} [A11]_{[10 \times 10]} & : & [A12]_{[10 \times 6]} \\ \dots\dots\dots & : & \dots\dots\dots \\ [A21]_{[6 \times 10]} & : & [A22]_{[6 \times 6]} \end{bmatrix}_{[16 \times 16]} \quad (3.34)$$

şeklinde elde edilir. Burada [A12] ve [A21] matrisleri sıfır matrislerdir. [A11] matrisinin elemanları:

$$\begin{aligned} A11(1, 1) &= RK1 \\ A11(1, 3) &= 1 \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} A11(2, 2) &= RK2 \\ A11(2, 4) &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A11(3, 3) &= (GK1 + G1S1 + GS61) / GK1 \\ A11(3, 5) &= -G1S1 / GK1 \\ A11(3, 10) &= -GS61 / GK1 \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} A11(4, 4) &= (GK2 + GS32 + GS42) / GK2 \\ A11(4, 7) &= -GS32 / GK2 \\ A11(4, 8) &= -GS42 / GK2 \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} A11(5, 3) &= -G1S1 \\ A11(5, 5) &= G1S1 + GS1S2 \\ A11(5, 6) &= -GS1S2 \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} A11(6, 5) &= -GS1S2 \\ A11(6, 6) &= GS1S2 + GS2S3 \\ A11(6, 7) &= -GS2S3 \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} A11(7, 4) &= -GS32 \\ A11(7, 6) &= -GS2S3 \\ A11(7, 7) &= GS32 + GS2S3 \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} A11(8, 4) &= -GS42 \\ A11(8, 8) &= GS42 + GS4S5 \\ A11(8, 9) &= -GS4S5 \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} A_{11}(9, 8) &= -GS_{4S5} \\ A_{11}(9, 9) &= GS_{4S5} + GS_{5S6} \\ A_{11}(9, 10) &= -GS_{5S6} \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} A_{11}(10, 3) &= -GS_{61} \\ A_{11}(10, 9) &= -GS_{5S6} \\ A_{11}(10, 10) &= GS_{61} + GS_{5S6} \end{aligned} \quad (3.43)$$

[A22] matrisi elemanları:

$$\begin{aligned} A_{22}(1, 1) &= GR_1 + GR_{1R2} \\ A_{22}(1, 2) &= -GR_{1R2} \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned} A_{22}(2, 1) &= -GR_{1R2} \\ A_{22}(2, 2) &= GR_{1R2} + GR_{2R3} \\ A_{22}(2, 3) &= -GR_{2R3} \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} A_{22}(3, 2) &= -GR_{2R3} \\ A_{22}(3, 3) &= GR_{2R3} + GR_3 \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} A_{22}(4, 4) &= GR_4 + GR_{4R5} \\ A_{22}(4, 5) &= -GR_{4R5} \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} A_{22}(5, 4) &= -GR_{4R5} \\ A_{22}(5, 5) &= GR_{4R5} + GR_{5R6} \\ A_{22}(5, 6) &= -GR_{5R6} \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} A_{22}(6, 5) &= -GR_{5R6} \\ A_{22}(6, 6) &= GR_{5R6} + GR_6 \end{aligned} \quad (3.49)$$

biçimindedir. Burada,

RK1,RK2: Güç merkezleri kaynak dirençleri,
GK1,GK2: Güç merkezleri kaynak iletkenlikleri,
G1S1 : 1 düğümü ile S1 düğümü arasındaki iletkenlik,
GS1S2: S1 düğümü ile S2 düğümü arasındaki iletkenlik,
.....
GS61 : S6 düğümü ile 1 düğümü arasındaki iletkenlik,

GR1,GR3,GR4,GR6 : R1,R3,R4,R6 ray düğümleri ile toprak
arasındaki iletkenlikler,

GR1R2: R1 düğümü ile R2 düğümü arasındaki iletkenlik,

.....

GR5R6: R5 düğümü ile R6 düğümü arasındaki iletkenliktir.



BÖLÜM 4

SİMÜLASYON FARK DENKLEMLERİNİN TÜRETİLMESİ

Simülasyon programında lineer ve lineer olmayan kısımlara ait fark denklemleri değişik biçimlerde değerlendirilir. Bu bölümde bu işlemlerin nasıl yapıldığı açıklanmıştır.

4.1. Lineer Bloklara İlişkin Fark Denklemlerinin Türetilmesi

Sistemi simüle eden bilgisayar programında lineer kısımların fark denklemleri 3 temel blok kullanılarak türetilmiştir. Bu temel bloklar

1. Entegrasyon bloğu,
2. Birinci mertebeden sistem bloğu,
3. İkinci mertebeden sistem bloğudur.

Bu bloklara ilişkin fark denklemleri türetilirken, her bloğun s-tanım bölgesi transfer fonksiyonu, uygun mertebeden bir tutucu transfer fonksiyonu ile çarpılır, z-dönüşümü alınır ve bu dönüşümden fark denklemlerine geçilir.

4.1.1. Entegrasyon Bloğuna İlişkin Fark Denklemlerinin Türetilmesi

İntegral terimi,

$$y(t) = K \int_0^t x(t) dt \quad (4.1)$$

olarak tanımlanır. Burada K kazanç, x(t) giriş, y(t) çıkış değişkenini göstermektedir. Bu terimin s-tanım bölgesi transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{K}{s} \quad (4.2)$$

biçimindedir. Bu terim için en iyi sonucu veren poligonal tutucunun s-tanım bölgesindeki transfer fonksiyonu

$$G_{ZOH}(s) = \frac{e^{Ts} + e^{-Ts} - 2}{Ts^2} \quad (4.3)$$

biçiminde olup , bu terim (4.2) ifadesi ile çarpılır, z-dönüşümü alınır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = Z \left\{ \frac{e^{Ts} + e^{-Ts} - 2}{Ts^2} \frac{K}{s} \right\} = \left(\frac{z - z^{-1} - 2}{T} \right) Z \left\{ \frac{K}{s^3} \right\} \quad (4.4)$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{(z-1)^2}{Tz} \frac{KT^2 z(z+1)}{2(z-1)^3} = \frac{KT(z+1)}{2(z-1)} = \frac{KT}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (4.5)$$

$$Y(z) (1-z^{-1}) = \frac{KT}{2} (1+z^{-1}) X(z) \quad (4.6)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeden fark denklemi

$$y(k) = \frac{KT}{2} [x(k) + x(k-1)] + y(k-1) \quad (4.7)$$

olarak elde edilir. Burada T örnekleme zamanıdır.

4.1.2. Birinci Mertebeden Sistem Bloğuna İlişkin Fark Denkleminin Türetilmesi

Birinci mertebeden sistem

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K \cdot x(t) \quad (4.8)$$

biçiminde tanımlanır. Burada τ zaman sabiti, K kazanç, $x(t)$ giriş $y(t)$ çıkış değişkenini göstermektedir. Sisteme ilişkin s-tanım bölgesi transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (4.9)$$

şeklindedir. Bu ifade sıfırdan birinci mertebeden tutucu transfer

fonksiyonu ile çarpılır, z-dönüşümü alınır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$G(z) = Z\left\{\frac{1-e^{-sT}}{s} \frac{K}{\tau s+1}\right\} = K \cdot \frac{z-1}{z} Z\left\{\frac{1}{s(\tau s+1)}\right\} = K \cdot \frac{z-1}{z} Z\left\{\frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s+1}\right\} \quad (4.10)$$

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = K \frac{z-1}{z} \left\{ \frac{z}{z-1} - \frac{z}{(z-e^{-T/\tau})} \right\} = K \left(\frac{1-e^{-T/\tau}}{z-e^{-T/\tau}} \right) \quad (4.11)$$

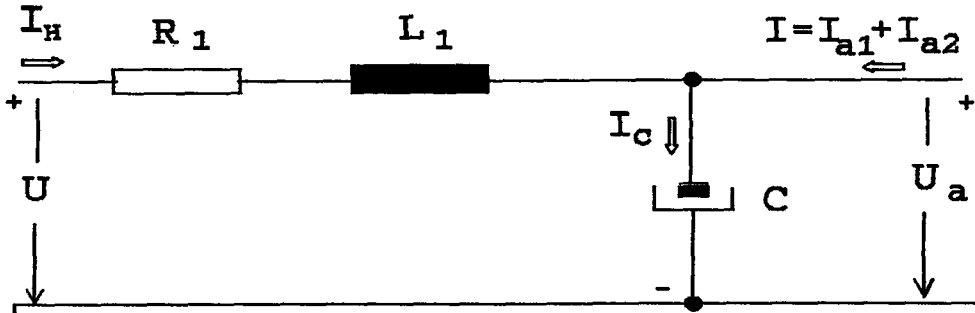
ifadesi elde edilir. Bu ifadeden fark denklemi

$$y(k) = K \cdot (1-e^{-T/\tau}) \cdot x(k-1) + e^{-T/\tau} \cdot y(k-1) \quad (4.12)$$

biçiminde elde edilir.

4.1.3. İkinci mertebeden sistem bloğuna ilişkin fark denkleminin türetilmesi

İkinci mertebeden sistem davranışı gösteren giriş filtresine (şekil 4-1) ilişkin fark denklemleri, süperpozisyon ilkesi uygulanarak iki fark denklemin toplamı şeklinde ifade edilmiştir.



şekil 4-1: Giriş filtresi

R_1 [ohm]: Seyir iletkeninden (kataner) kapasiteye kadar olan toplam direnç,

L_1 [H] : toplam endüktans,

U [V] : temas noktasındaki kataner gerilimi,

$U_a[V]$: motor gerilimi,
 $C [F]$: filtre kapasitesi,
 $I[A]$: motorların çektiği akım,
 $I_H[A]$: seyir iletkeninden çekilen akım,

$I=0$ için

$$G_1(s) = \frac{U_{a2}(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{L_1 C}}{s^2 + s \frac{R_1}{L_1} + \frac{1}{L_1 C}} \quad (4.13)$$

$U=0$ için

$$G_1(s) = \frac{U_{a2}(s)}{I(s)} = \frac{1}{C} \frac{s + \frac{R_1}{L_1}}{s^2 + s \frac{R_1}{L_1} + \frac{1}{L_1 C}} \quad (4.14)$$

biçiminde yazılabilir. (4.7) ve (4.12) denklemlerinin elde edilmesinde yapılan işlemler tekrarlandığında, filtreye ilişkin fark denklemleri,

$$\alpha = \frac{R_1}{2L_1}, \quad \beta = \sqrt{\frac{1}{L_1 C} - \frac{R_1^2}{4L_1^2}}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{L_1 C}}, \quad a_0 = \frac{R_1}{L_1} \quad (4.15)$$

$$\Phi_1 = \arctan\left(\frac{-\alpha}{\beta}\right), \quad \Phi_2 = \arctan\frac{\alpha^2 + \beta^2 - a_0^2}{a_0 \beta}$$

$$A_1 = 1 - e^{-\alpha T} \frac{1}{\cos \Phi_1} \cos(\beta T + \Phi_1)$$

$$B_1 = -2e^{-\alpha T} \cos(\beta T) + e^{-\alpha T} \frac{1}{\cos \Phi_1} \cos(\beta T + \Phi_1) + e^{-2\alpha T} \quad (4.16)$$

$$C_1 = -2e^{-\alpha T} \cos(\beta T), \quad D_1 = e^{-2\alpha T}$$

$$A_2 = 1 - e^{-\alpha T} \frac{1}{\cos \Phi_2} \cos(\beta T + \Phi_2)$$

$$B_2 = -2e^{-\alpha T} \cos(\beta T) + e^{-\alpha T} \frac{1}{\cos \Phi_2} \cos(\beta T + \Phi_2) + e^{-2\alpha T}$$

olmak üzere

$$U_{a1}(k) = \frac{\omega^2}{\alpha^2 + \beta^2} [A_1 U(k-1) + B_1 U(k-2)] - C_1 U_{a1}(k-1) - D_1 U_{a1}(k-2) \quad (4.17)$$

$$U_{a2}(k) = \frac{a_0/C}{\alpha^2 + \beta^2} [A_2 I(k-1) + B_2 I(k-2)] - C_1 U_{a2}(k-1) - D_1 U_{a2}(k-2) \quad (4.18)$$

$$U_a(k) = U_{a1}(k) + U_{a2}(k) \quad (4.19)$$

biçiminde elde edilir.

$$\beta^2 = \frac{1}{L_1 C} - \frac{R_1^2}{4L_1^2} = 0 \quad (4.20)$$

olması durumunda , filtre katlı kutup sistem davranışı gösterir. Bu durumda

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{\pi}{2} , \quad A_1 = A_2 = 1 - e^{-\alpha T} , \quad B_1 = B_2 = e^{-2\alpha T} - e^{-\alpha T} \quad (4.21)$$

dir. (4.17) ve (4.18) denklemlerinde A_1 , A_2 , B_1 , B_2 katsayıları yerine bu değerler alınmalıdır.

$\beta^2 < 0$ için filtre reel kutuplu sistem davranışı gösterir. Bu durumda fark denklemi,

$$p_1 = -\alpha + \sqrt{-\beta^2} , \quad p_2 = -\alpha - \sqrt{-\beta^2} \quad (4.22)$$

sisteme ilişkin reel kutuplar olmak üzere

$$U_{a1}(k) = -B_2 U_{a1}(k-1) - B_1 U_{a1}(k-2) + A_{12} U(k-1) + A_{11} U(k-2) + A_{10} U(k-3) \quad (4.23)$$

$$U_{a2}(k) = -B_2 U_{a2}(k-1) - B_1 U_{a2}(k-2) + A_{22} I(k-1) + A_{21} I(k-2) + A_{20} I(k-3) \quad (4.24)$$

$$U_a(k) = U_{a1}(k) + U_{a2}(k) \quad (4.25)$$

biçiminde elde edilir. Burada,

$$\begin{aligned} x_{11} &= \frac{1}{p_1 p_2} , & x_{12} &= \frac{1}{p_1 (p_1 - p_2)} , & x_{13} &= \frac{1}{p_2 (p_2 - p_1)} \\ x_{21} &= \frac{a_0}{p_1 p_2} , & x_{22} &= \frac{a_0 - p_1}{p_1 (p_1 - p_2)} , & x_{23} &= \frac{a_0 - p_2}{p_2 (p_2 - p_1)} \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} A_{12} &= x_{11} + x_{12} e^{-p_1 T} + x_{13} e^{-p_2 T} \\ A_{11} &= x_{11} (-e^{-p_1 T} - e^{-p_2 T}) + x_{12} e^{-p_1 T} (-1 - e^{-p_2 T}) + x_{13} e^{-p_2 T} (-1 - e^{-p_1 T}) \\ A_{10} &= e^{-(p_1 - p_2) T} (x_{11} + x_{12} + x_{13}) \\ B_2 &= -e^{-p_1 T} - e^{-p_2 T} \\ B_1 &= e^{-(p_1 - p_2) T} \\ A_{22} &= x_{21} + x_{22} e^{-p_1 T} + x_{23} e^{-p_2 T} \\ A_{21} &= x_{21} (-e^{-p_1 T} - e^{-p_2 T}) + x_{22} e^{-p_1 T} (-1 - e^{-p_2 T}) + x_{23} e^{-p_2 T} (-1 - e^{-p_1 T}) \end{aligned} \quad (4.27)$$

biçiminde tanımlanan katsayılardır.

4.2. Lineer Olmayan Kısımlara İlişkin Fark Denklemlerinin Türetilmesi

Lineer olmayan kısımlara ilişkin fark denklemleri türetilirken her örnekleme adımında ,bu kısımlara ilişkin ifadelerin o andaki değerleri alınır. Bir örnekleme periyodu süresince bu değerlerin değişmediği kabul edilir.

4.2.1. Manyetik Akı Fonksiyonu

Manyetik akı fonksiyonuna ilişkin fark denklemi, (3.29) denkleminde hareketle

$$\Phi(k) = \xi_s (1 - e^{-\theta \cdot T_s(k)}) - \Gamma \cdot I_a^0(k) \quad (4.28)$$

biçiminde yazılabilir. Her adımda uyarma ve rotor akımlarının aldıkları değerlere göre akı hesaplanır.

4.2.2. Sürtünme-hava Direnci

Sürtünme-hava direnci $TRR(k)$, (3.7) ifadesinden

hareketle

$$TRR(k) = k_0 + k_1 \cdot v(k) + k_2 \cdot v^2(k) \quad (4.29)$$

biçiminde yazılabilir. Her adımda hıza bağlı olarak sürtünme-hava direnci hesaplanır.

4.2.3. Eğim Direnci TRS(k)

Eğim direnci TRS(k), (3.8) ifadesinden hareketle

$$TRS(k) = m \cdot g \cdot \sin(\alpha(k)) = m \cdot g \cdot \tan(\alpha(k)) = m \cdot g \cdot \frac{h(k)}{1000} \quad (4.30)$$

ilişkisinden hesaplanır.

4.2.4. Dönemeç (eğrilik) Direnci TRC(k)

Dönemeç direnci TRC(k), (3.9) ifadesinden hareketle

$$TRC(k) = m \cdot g \cdot \frac{C1 - C2 \cdot R(k)}{R(k) - C3} \quad (4.31)$$

ilişkisinden hesaplanır.

4.3. Sisteme İlişkin Simülasyon Fark Denklemleri

Sistemde bulunan lineer ve lineer olmayan bloklara ilişkin fark denklemleri bölüm (4.1) ve (4.2) de türetilmiştir. Bu denklemlerden yararlanarak simülasyon programında kullanacağımız fark denklemleri yazılacaktır.

4.3.1. Rotor Akımına İlişkin Fark Denklemleri

Rotor akımına ilişkin fark denklemleri, bölüm (3.3.1)'de yazılan rotor akımına ilişkin devre denklemlerinden türetilir. Bu denklemlerden, (3.12) denklemi (4.8) denklemi biçimine getirilerek

$$\frac{\Sigma L}{\Sigma R} \frac{di_a(t)}{dt} + i_a(t) = \frac{1}{\Sigma R} [u(t) - \Sigma e(t) - 2.\Delta u] \quad (4.32)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde sağ taraftaki $u(t)$ kaynak gerilimi ve $e(t)$ zıt EMK terimlerinin bir örnekleme periyodu süresince sabit kaldığı varsayılarak (4.12) fark denklemi biçiminde yazılabilir. Buna göre, motor çalışmada T tristörünün iletimde olması durumunda rotor akımına ilişkin fark denklemi

$$x(k) = u_a(k) - 2.e(k) - 2.\Delta U$$

$$\tau_a = \frac{\Sigma L}{\Sigma R} \quad (4.33)$$

$$K_a = \frac{1}{\Sigma R}$$

olmak üzere

$$I_a(k) = K_a(1 - e^{-T/\tau_a}) . x(k-1) + I_a(k-1) . e^{-T/\tau_a} \quad (4.34)$$

biçiminde yazılabilir.

Benzer düşünceyle, motor çalışmada T tristörünün kesimde olması durumunda, (3.13) devre denkleminde hareketle, rotor akımına ilişkin fark denklemi

$$x(k) = -2.e(k) - 2.\Delta U$$

$$\tau_a = \frac{\Sigma L}{\Sigma R} \quad (4.35)$$

$$K_a = \frac{1}{\Sigma R}$$

olmak üzere

$$I_a(k) = K_a(1 - e^{-T/\tau_a}) . x(k-1) + I_a(k-1) . e^{-T/\tau_a} \quad (4.36)$$

biçiminde, yazılabilir.

Fren çalışma modunda, T tristörünün iletimde olması durumunda (3.14) devre denkleminde hareketle rotor akımına

ilişkin fark denklemi

$$x(k) = 2 \cdot e(k) - 2 \cdot \Delta U$$

$$\tau_a = \frac{\Sigma L}{\Sigma R} \quad (4.37)$$

$$K_a = \frac{1}{\Sigma R}$$

olmak üzere

$$I_a(k) = K_a (1 - e^{-T/\tau_a}) \cdot x(k-1) + I_a(k-1) \cdot e^{-T/\tau_a} \quad (4.38)$$

biçiminde, T tristörünün kesimde olması durumunda (3.15) devre denkleminde hareketle rotor akımına ilişkin fark denklemi

$$x(k) = 2 \cdot e(k) - u_a(k) - 2 \cdot \Delta U$$

$$\tau_a = \frac{\Sigma L}{\Sigma R} \quad (4.39)$$

$$K_a = \frac{1}{\Sigma R}$$

olmak üzere

$$I_a(k) = K_a (1 - e^{-T/\tau_a}) \cdot x(k-1) + I_a(k-1) \cdot e^{-T/\tau_a} \quad (4.40)$$

biçiminde yazılabilir.

Motorların uyarma devrelerine ilişkin fark denklemi ise, (3.17) devre denkleminde hareketle

$$I_f(k) = K_f (1 - e^{-T/\tau_f}) \cdot U_f(k-1) + I_f(k-1) \cdot e^{-T/\tau_f}$$

$$\tau_f = \frac{\Sigma L_f}{\Sigma R_f} \quad (4.41)$$

$$K_f = \frac{1}{\Sigma R_f}$$

biçiminde yazılır.

Motorlara ilişkin zıt EMK ifadesi fark denklemi, (3.16) denkleminde hareketle

$$K_e = k_e \cdot 60 \cdot \frac{\bar{u}}{\pi \cdot D} \quad (4.42)$$

olarak alınır

$$e(k) = K_e \cdot \Phi(k) \cdot v(k) \quad (4.43)$$

biçiminde yazılabilir.

Moment ifadesinin fark denklemi

$$M_m(k) = k_m \cdot \Phi(k) \cdot I_a(k) \quad (4.44)$$

biçiminde, bir vagona ilişkin çekme kuvveti, (3.5) denklemlerinden, hızlanmada

$$Z(k) = M_m(k) \cdot \frac{8}{D} \cdot \bar{u} \cdot \eta_d \quad (4.45)$$

biçiminde, frenlemede

$$Z(k) = M_m(k) \cdot \frac{8}{D \cdot \eta_d} \cdot \bar{u} \quad (4.46)$$

biçiminde yazılır.

Hareket denkleminin ilişkin fark denklemini elde etmek için (3.1) denklemini (4.1) denklemi biçiminde yazarak (4.47) denklemi elde edilir.

$$(4.47) \quad v(t) = \frac{1}{m(1+p)} \int_0^t (Z - TR) dt$$

Bu ifadeye ilişkin fark denklemini elde etmek için bölüm 4'de (4.7) denklemi ile verilen integrasyon bloğuna ait fark denkleminin yararlanılır. Böylece hızlanmaya ilişkin

fark denklemi (4.47) denkleminin (4.7) denklemi biçiminde yazılmasıyla

$$v(k) = \frac{T}{2m(1+p)} \cdot \{ [Z(k) - TR(k)] + [Z(k-1) - TR(k-1)] \} + v(k-1) \quad (4.48)$$

olarak elde edilir.

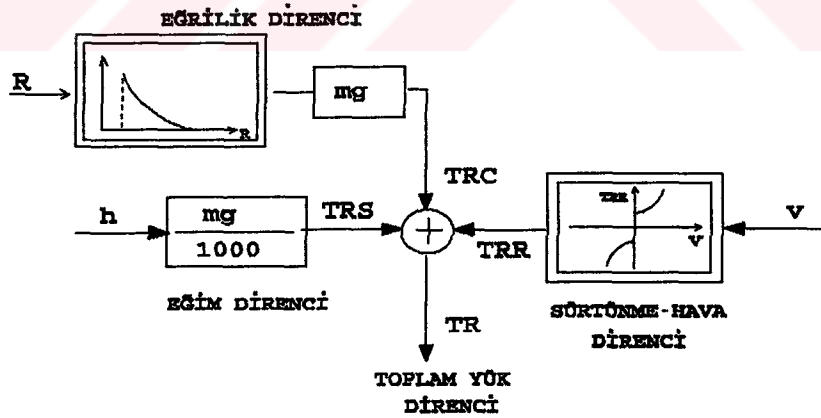
BÖLÜM 5

SİMÜLASYON PROGRAMI BLOK VE AKIŞ DİYAGRAMLARI

Simülasyon programı dört temel modülden oluşmaktadır. Bunlar toplam yük direnci, tahrik motorları, filtre ve sabit tesislere ilişkin modüllerdir. Aşağıda her modüle ilişkin blok diyagramları ve bu modülleri tanımlayan fark denklemleri verilmiştir.

5.1. Toplam Yük Direnci Modülü ve Fark Denklemleri

Bir vagona ilişkin toplam yük direnci üç bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, sürtünme-hava direnci TRR, eğim direnci TRS ve dönemeç (eğrilik) direnci TRC'dir.

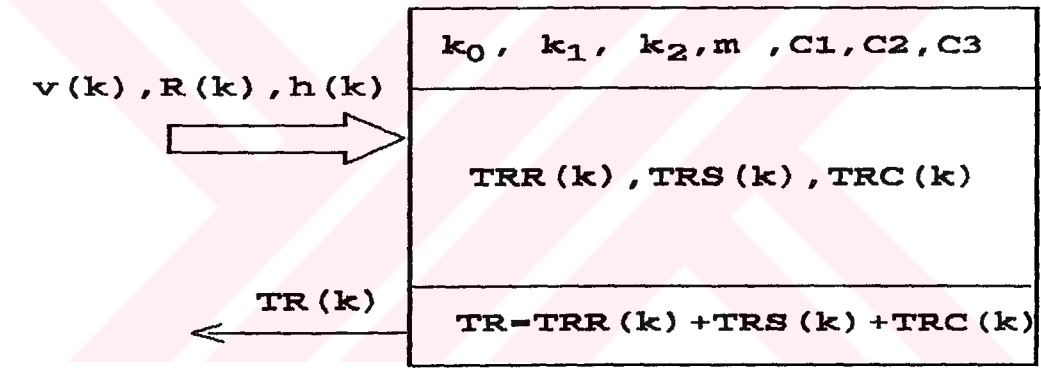


Şekil 5-1: Yüke ilişkin blok diyagramı

Bu terimlere ilişkin ifadeler bölüm 4.'de (4.29), (4.430) ve (4.31) bağıntıları ile verilmişti. Şekil 5-1'de yük modülüne

ilişkin blok diyagramı görülmektedir. Her adımda, bin metrede seviye farkı $h[m]$, eğrilik yarıçapı $R[m]$, ve hız $v[m/s]$ giriş parametreleri olarak okunur, ayrıca toplam kütle $m[kg]$ ve yerçekimi ivmesi $g[m/s^2]$ bilindiğine göre, toplam yük direnci $TR[N]$ hesaplanır. Bu modüle ilişkin fark denklemleri (5.1)'de ve program bloğu şekil 5-2'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} TRR(k) &= k_0 + k_1 \cdot v(k) + k_2 \cdot v^2(k) \\ TRS(k) &= m \cdot g \cdot \frac{h(k)}{1000} \\ TRC(k) &= m \cdot g \cdot \frac{C1 - C2 \cdot R(k)}{R(k) - C3} \\ TR(k) &= TRR(k) + TRS(k) + TRC(k) \end{aligned} \quad (5.1)$$

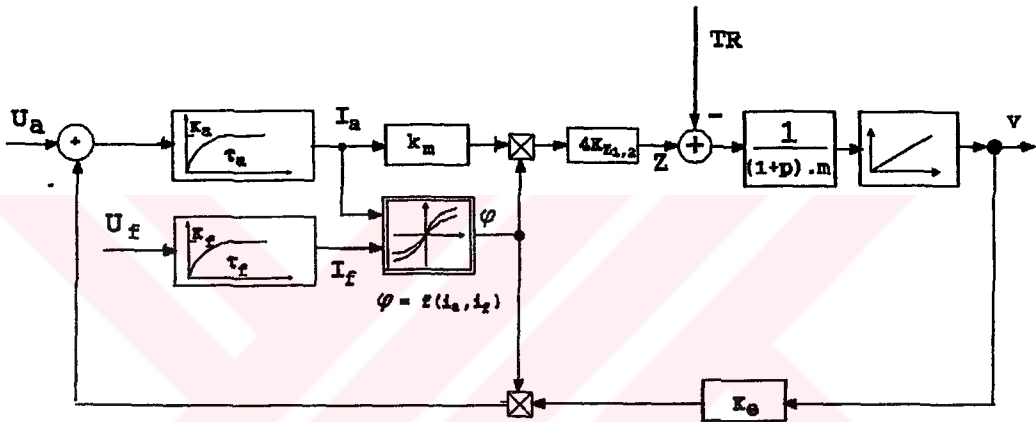


Şekil 5-2: Yük modülüne ilişkin program bloğu

5.2. Tahrik Motorları Modülü ve Fark Denklemleri

Sistemde tahrik motorları olarak kullanılan doğru akım serbest uyarmalı motorlara ilişkin blok diyagramı şekil 5-3'de görülmektedir. Bu diyagramda, görüldüğü gibi rotor akımı I_a , uyarma akımı I_f ve hız v gibi lineer kısımlar ve manyetik akı Φ gibi lineer olmayan kısımlar bulunmaktadır.

Bu modüle ilişkin fark denklemleri, 4.bölümde türetilen (4.33-48) denklemlerinden hareketle, simülasyon programının yürütülüş sırasına göre (5.4) ifadeleriyle toplu olarak verilmiştir. Program bloğu içinde sabit değerli parametrelere ilişkin ifadeler (5.2) bloğu içinde, tahrik motorunun çalışma durumlarına göre (4.33),(4.35),(4.37) ve (4.39) ifadeleriyle tanımlanan $x(k)$ değişkeni (5.3) bloğu içinde yer almaktadır.



Şekil 5-3: Tahrik motoruna ilişkin blok diyagram

$$\begin{aligned}
 K_e &= k_e \frac{60 \cdot \tilde{U}}{\pi \cdot D} , \quad K_{Z_1} = \frac{2 \cdot \tilde{U} \cdot \eta}{D} , \quad K_{Z_2} = \frac{2 \cdot \tilde{U} \cdot \eta}{D} \\
 K_a &= \frac{1}{\Sigma R_a} , \quad \tau_a = \frac{\Sigma L_a}{\Sigma R_a} , \quad K_f = \frac{1}{\Sigma R_f} \\
 \tau_f &= \frac{\Sigma L_f}{\Sigma R_f} , \quad P = \frac{\Sigma J \cdot \omega^2}{m \cdot v^2} \\
 T, \xi, \beta, \Gamma, \delta
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Tahrik motorları modülüne ilişkin fark denklemleri (5.3) ve (5.4)'de, program bloğu şekil 5-4'de verilmiştir.

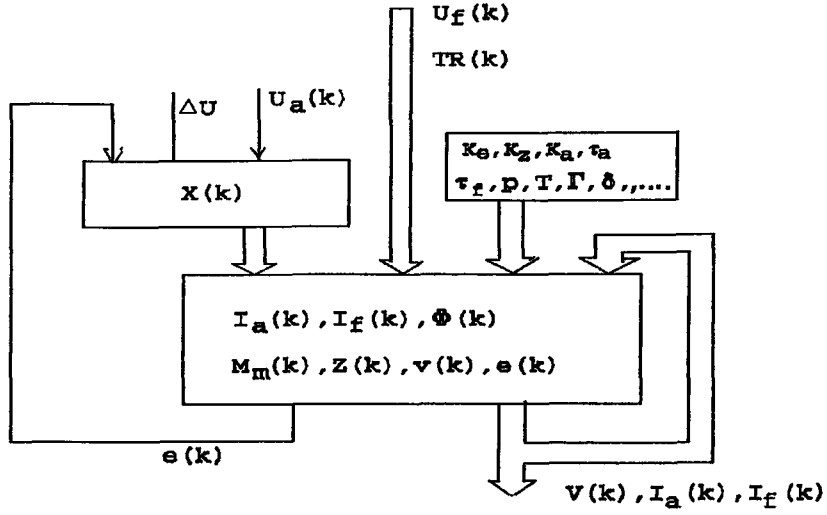
$$\begin{aligned}
 x(k) &= u_a(k) - 2 \cdot e(k) - 2 \cdot \Delta U \\
 x(k) &= -2 \cdot e(k) - 2 \cdot \Delta U \\
 x(k) &= 2 \cdot e(k) - 2 \cdot \Delta U \\
 x(k) &= 2 \cdot e(k) - u_a(k) - 2 \cdot \Delta U
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

$$\begin{aligned}
 I_a(k) &= K_a \cdot (1 - e^{-T/\tau_a}) \cdot x(k-1) + I_a(k-1) \cdot e^{-T/\tau_a} \\
 I_f(k) &= K_f \cdot (1 - e^{-T/\tau_f}) \cdot U_f(k-1) + I_f(k-1) \cdot e^{-T/\tau_f} \\
 \Phi(k) &= \xi \cdot (1 - e^{-\beta \cdot I_f(k)}) - \Gamma \cdot I_a^{\delta}(k) \\
 M_m(k) &= k_m \cdot \Phi(k) \cdot I_a(k) \\
 Z(k) &= 4 \cdot K_{s_i} \cdot M_m(k) \quad , \quad i=1,2 \\
 v(k) &= v(k-1) + \frac{T}{2m(1+p)} [Z(k) - TR(k) + Z(k-1) - TR(k-1)] \\
 e(k) &= K_e \cdot \Phi(k) \cdot v(k)
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

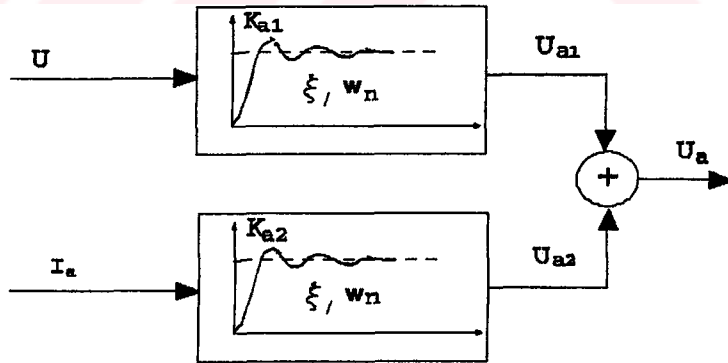
Bu modülde her adımda, $U_a(k)$ hat (filtre çıkış) gerilimi, $U_f(k)$ uyarma devresi gerilimi ve $TR(k)$ toplam seyir direnci okunarak, rotor akımı $I_a(k)$, uyarma akımı $I_f(k)$, manyetik akı $\Phi(k)$, çekme kuvveti $Z(k)$, hız $v(k)$ ve zıt EMK ifadesi $e(k)$ hesaplanır.

5.3. Filtre Modülü ve Fark Denklemleri

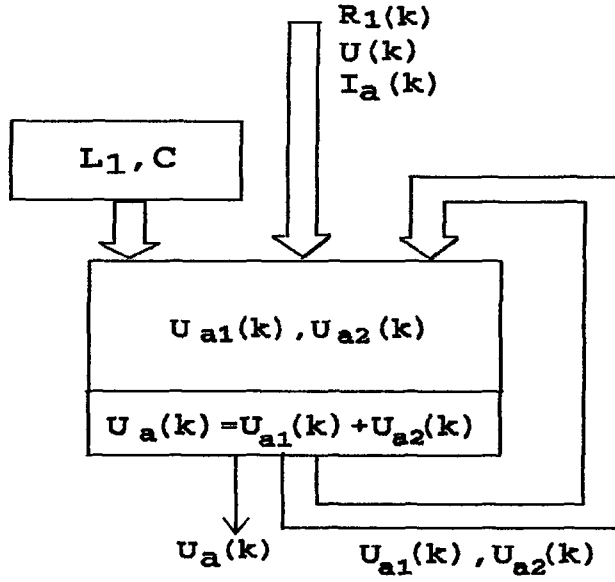
Filtreye ilişkin blok diyagramı şekil 5-5'de program bloğu şekil 5-6 da verilmiştir. Filtreye ilişkin program bloğunda her adımda, motorların çektiği akım $I_a(k)$, hat (kataner) gerilimi $U(k)$ ve hat direnci $R_l(k)$ okunarak motor uçlarına gelen filtre çıkış gerilimi $U_a(k)$ hesaplanır. Bu modüle ilişkin fark denklemleri bölüm 4.'de (4.17), (4.18) ve (4.19) ifadeleri ile verilmişti.



Şekil 5-4: Tahrik motorlarına ilişkin program bloğu



Şekil 5-5: Filtreye ilişkin blok diyagramı



Şekil 5-6: Filtreye ilişkin program bloğu

5.4. Sabit Tesislere İlişkin Program Bloğu ve Fark Denklemleri

Sabit tesisler, güç merkezleri, seyir hatları ve raylardan oluşur. Simülasyon programında, sistemin iki taraftan beslendiği ve iki güç merkezi arasında, bir yönde en fazla 3 katarın (bir, iki veya üç vagonlu) hareket ettiği varsayılmıştır. Bir katarın bir yönde hareketi sırasında hat ve ray dirençleri, katarın konumuna bağlı olarak değişir. Sabit tesislere ilişkin devre modeli, bölüm 3.5'de verilmiş ve devre denklemleri matrisel olarak

$$[A] [x] = [b] \quad (5.5)$$

biçiminde yazılmıştı. Bu denklem sistemindeki $[A]$ matrisinin elemanları (3.35-3.49) ifadeleriyle, $[x]$ ve $[b]$ vektörlerinin elemanları (3.32) ve (3.33) ifadeleriyle verilmişti. Bu denklem sisteminin çözümüne ilişkin işlemler aşağıda

açıklanacaktır.

5.4.1. [A] Matrisi Elemanlarının Belirlenmesi

[A] matrisinin elemanlarına ilişkin (3.36-49) ifadeleri vagonların konumuna göre değişir. [A] matrisi eleman değerlerinin saptanabilmesi için her adımda vagonların konumları ve bu değerlerden hareketle $R1S1$, $RS1S2$, ..., $RS5S6$, $RS61$ hat ve $RR1$, $RR1R2$, ..., $RR5R6$, $RR6$ ray dirençleri hesaplanır. Aşağıda bu işlemlerin gerçekleşmesinde kullanılan tanım ve ifadeler sırayla verilecektir.

5.4.1.1. Vagon Konumlarının Belirlenmesi

Vagon konumlarını şekil 3-5'de verilen devre modeline göre, Birinci vagonun ($T1$ indisi) konumu $L1$, ikinci vagonun konumu $L2$, ..., altıncı vagonun konumu $L6$ ile ifade edilsin. Buna göre, vagonlar ve güç merkezleri arasındaki mesafeleri şu şekilde tanımlanabilir:

($L1$) konumu ile ($L2$) konumu arasındaki mesafe: $L12$,
($L2$) konumu ile ($L3$) konumu arasındaki mesafe: $L23$,
($L4$) konumu ile ($L5$) konumu arasındaki mesafe: $L45$,
($L5$) konumu ile ($L6$) konumu arasındaki mesafe: $L56$,

birinci güç merkezi ile $L1$ konumu arasındaki mesafe: $L11$,
birinci güç merkezi ile $L6$ konumu arasındaki mesafe: $L16$,
ikinci güç merkezi ile $L3$ konumu arasındaki mesafe: $L33$,
ikinci güç merkezi ile $L6$ konumu arasındaki mesafe: $L24$,
olsun. Bir vagonun konumu ve mesafelere ilişkin fark denklemleri şu şekilde türetilebilir: Hızı v olan bir aracın aldığı yol S

$$S = \int_0^t v(t) dt \quad (5.6)$$

ilişkisiyle verilir. Bu ifadeye ilişkin fark denklemi

$$S(k) = \frac{T}{2} [v(k) + v(k-1)] + S(k-1) \quad (5.7)$$

biçimindedir (bak 4.7). Buna göre vagonlara ilişkin $L_1(k)$, $L_2(k)$, $L_3(k)$, $L_4(k)$, $L_5(k)$, $L_6(k)$ konumları, (5.7) denklemi türünde,

$$L_j(k) = \frac{T}{2} [v_j(k) + v_j(k-1)] + L_j(k-1) \quad \{j=1,2,\dots,6\} \quad (5.8)$$

şeklinde yazılabilir.

5.4.1.2. Hat iletkenliklerinin Belirlenmesi

Bir Hattın iletkenliği

$$G = \chi_s \cdot \frac{A_s}{L_s} \quad , \quad [1/\Omega] \quad (5.9)$$

ifadesiyle verilir. Burada, $A_s [\text{mm}^2]$ olarak iletken kesiti, $\chi_s [\text{m}/\Omega \text{mm}^2]$ olarak öziletkenlik katsayısıdır. Buna göre [A11] alt matrisinde kullanılan (3.36-43) ifadeleriyle kullanılan hat iletkenlikleri (5.10)'da toplu olarak verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} GS1S1(k) &= \chi_s \frac{A}{L11(k)} \quad , \quad GS1S2(k) = \chi_s \frac{A}{L2(k) - L1(k)} \\ GS2S3(k) &= \chi_s \frac{A}{L3(k) - L2(k)} \quad , \quad GS32(k) = \chi_s \frac{A}{L33(k)} \\ GS42(k) &= \chi_s \frac{A}{L24(k)} \quad , \quad GS4S5(k) = \chi_s \frac{A}{L5(k) - L4(k)} \\ GS5S6(k) &= \chi_s \frac{A}{L6(k) - L5(k)} \quad , \quad GS61(k) = \chi_s \frac{A}{L16(k)} \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

5.4.1.3. Ray iletkenliklerinin Belirlenmesi

Bir rayın iletkenliği,

$$G = \chi_R \frac{A_R}{L_R} \quad [1/\Omega] \quad (5.11)$$

ifadesiyle verilir. Burada, A_R [mm²] iki paralel rayın toplam kesiti, L_R [m] ray uzunluğu, χ_R [m/Ωmm²] ray öziletkenlik katsayısıdır. Buna göre [A22] alt matrisine ilişkin (3.44-49) ifadelerinde kullanılan ray iletkenlikleri (5.12) ifadeleriyle toplu olarak verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} GR1(k) &= \chi_R \frac{A_R}{L11(k)} , & GR1R2(k) &= \chi_R \frac{A_R}{L2(k) - L1(k)} \\ GR2R3(k) &= \chi_R \frac{A_R}{L3(k) - L2(k)} , & GR3(k) &= \chi_R \frac{A_R}{L33(k)} \\ GR4(k) &= \chi_R \frac{A_R}{L24(k)} , & GR4R5(k) &= \chi_R \frac{A_R}{L5(k) - L4(k)} \\ GR5R6(k) &= \chi_R \frac{A_R}{L6(k) - L5(k)} , & GR6(k) &= \chi_R \frac{A_R}{L16(k)} \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

5.4.2. [b] Vektörü Elemanlarının Belirlenmesi

[b] vektörü, güç merkezleri besleme gerilimleri V_{K1} , V_{K2} ve vagonların çektiği $I_{T1}, I_{T2}, \dots, I_{T6}$ akımlarından oluşur. Bu elemanlardan V_{K1} ve V_{K2} gerilimleri bilinmektedir. Vagon akımlarını belirlenebilmesi için şekil 4-1'de verilen giriş filtresi devre modelinden yararlanılacaktır. Bu devrede

$$U(t) - U_a(t) = R_1 I_R(t) + L_1 \frac{dI_R(t)}{dt} \quad (5.13)$$

ifadesi yazılabilir. Burada I_R bir vagona ilişkin iki tahrik motoru gurubunun (4 tahrik motorunun) çektiği akım, U_a giriş filtresi çıkış gerilimi, U ise hat gerilimini göstermektedir. Toplam hat akımı I_T , katarda tek vagon olması halinde

$I_T = I_H$, katarda n vagon olması halinde vagonların toplam akımına $I_T = nI_H$ ' ya eşittir. (5.13) ifadesine ilişkin fark denklemi, (4.12) denklemi biçiminde olup

$$I_H(k) = \frac{1}{R_1} (1 - e^{-T \cdot R_1 / L_1}) [U(k-1) - U_s(k-1)] + e^{-T \cdot R_1 / L_1} \cdot I_H(k-1) \quad (5.14)$$

şeklinde yazılabilir. Toplam hat akımı

$$I_T(k) = n \cdot I_H(k) \quad (5.15)$$

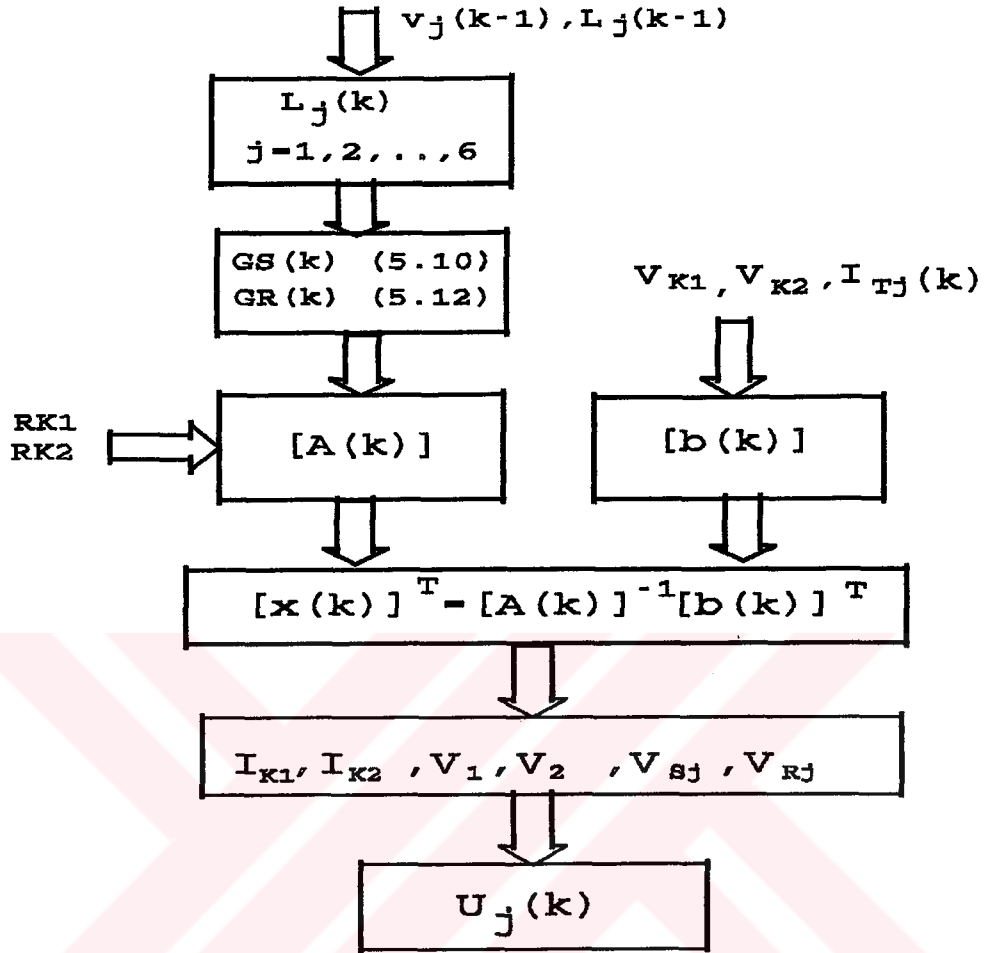
olarak alınır.

Her adımda, $[A]$ matrisi ve $[b]$ vektörüne ilişkin parametreler belirlendikten sonra (5.5) denklemi LU ayrıştırma yöntemiyle çözümlenerek, güç merkezinden çekilen I_{K1}, I_{K2} akımları ve şekil 3-5'de verilen devre modelindeki hat ve ray düğüm gerilimleri $V_{S1}, V_{S2}, \dots, V_{S6}; V_{R1}, V_{R2}, \dots, V_{R6}$ bulunur. Her vagona düşen gerilim

$$U_j(k) = V_{Sj}(k) - V_{Rj}(k) \quad \{j=1, 2, \dots, 6\} \quad (5.16)$$

ilişkisinden hesaplanır.

Sabit tesislere ilişkin (5.8), (5.10), (5.12), (5.14), (5.15) ve (5.16) fark denklemleri kullanılarak elde edilen program bloğu şekil 5-7' görülmektedir. Bu program bloğunda $[x]$ vektörüne ilişkin hat ve ray düğüm gerilimleri hesaplanır, her vagona düşen gerilimler (5.16) denklemine göre belirlenir.



Şekil 5-7: Sabit tesislere ilişkin program bloğu

BÖLÜM 6

ENERJİ OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, iki istasyon arasında belirli bir S yolunu belirli bir t zamanında kateden bir ulaşım aracının minimum enerji harcaması için gerekli koşullar çıkarılmış, bulunan sonuçların gerçekleştirilebilirliği tartışılmıştır. Enerji optimizasyonunda iki ayrı durum ele alınmıştır. Birinci durum enerji geri kazanımının (faydalı frenlemenin) yapılamadığı, ikinci durum ise faydalı frenlemenin yapılabildiği duruma aittir. Her iki uygulamada da verim göz önüne alınmamıştır. Ulaşım araçlarında, konfor bakımından yol alma ve frenleme ivmelerinin sabit olması gerektiği göz önünde bulundurularak optimal v_1 hızı, t_s yol alma zamanı ve t_b frenleme zamanı belirlenebilir. Enerji optimizasyonu için gerçekleştirilmesi gereken denklemler çok boyutludur ve eşitsizlik kısıtlamaları içermektedir. Bu denklem sistemi için Kuhn-Tucker koşulları kullanılarak optimal çözümler bulunur. Optimal çözümler:

f amaç fonksiyonu,
 g_j ($j=1,2,...,n$) < 0 eşitsizlik kısıtlamaları,
 h_j ($j=1,2,...,m$) = 0 eşitlik kısıtlamaları,
 λ ve μ lagrange çarpanları,
 ∇ tam diferansiyel operatörü olmak üzere,

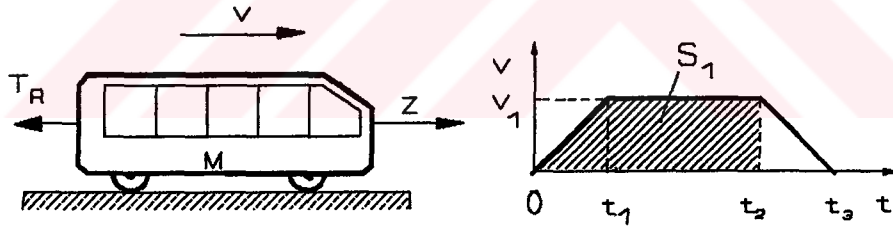
$$\begin{aligned} \nabla f(x^*) + \lambda \nabla h(x^*) + \mu \nabla g(x^*) &= 0 \\ \mu g(x^*) &= 0, \quad \mu \geq 0 \end{aligned} \quad (6.1)$$

biçiminde ifade edilen denklem sistemlerinin çözümünden elde edilir [35,36]. Ele aldığımız sistemde amaç fonksiyonu iki durak arasında tüketilen enerjiye karşı düşer.

6.1. Faydalı Frenlemenin Yapılamadığı Durum

Bu duruma ilişkin hız-zaman diyagramı şekil 6-1' de gösterilmiştir. Burada,

$Z[N]$: taşıta uygulanan toplam cer kuvveti,
 $T_R[N]$: taşıtın toplam direnç kuvveti,
 $M[kg]$: toplam taşıt kütlesi,
 $m[kg]=M(1+p)$: taşıtın eşdeğer kütlesi,
 $p[.]$: taşıtın dönen kısımlarının taşıt kütlesine etkisini gösteren bir katsayı,
 $t_1[s]$: sabit hıza erişme zamanı (hızlanma zamanı),
 $t_2[s]$: frenlemeye başlama zamanı,
 $t_3[s]$: varış zamanı,
 $v_1[m/s]$: maksimum seyir hızı,
 $S_1[m]$: frenlemeye kadar katedilen yolu ifade etmektedir.



Şekil 6-1: Taşıt ve hız-zaman diyagramı

Newton yasası gereği

$$Z - T_R = m \frac{dv}{dt} \quad (6.2)$$

ilişkisi yazılabilir (şekil 6-1). Dişli verimi %100 alınırsa taşıtın çektiği enerji

$$E = \int_0^s Z \cdot ds = \int_0^t Z \cdot \frac{ds}{dt} \cdot dt = \int_0^t Z \cdot v(t) \cdot dt, \quad v(t) = \frac{ds}{dt} \quad (6.3)$$

biçiminde ifade edilir.

$0 < t < t_1$ zaman aralığında (hızlanmada) tüm ifadeler 1 indisi ile gösterilmiş olup, Z_1 cer kuvveti için

$$Z_1 = m \frac{dv(t)}{dt} + T_R, \quad T_R = k_0 + k_1 v(t) + k_2 v^2(t) \quad (6.4)$$

yazılabilir. Burada k_0 , k_1 ve k_2 taşıt toplam direncine ilişkin katsayılarıdır. E_1 enerji ifadesi

$$E_1 = \int_0^{t_1} [m \frac{dv(t)}{dt} + k_0 + k_1 v(t) + k_2 v^2(t)] v(t) dt \quad (6.5)$$

olarak ifade edilebilir. Yol almada sabit a_1 ivmesi nedeniyle

$$v(t) = a_1 t, \quad v_1 = a_1 t_1 \quad (6.6)$$

ilişkileri geçerli olduğundan (6.5) denklemi

$$E_1 = \int_0^{t_1} (m a_1^2 t + k_0 a_1 t + k_1 a_1^2 t^2 + k_2 a_1^3 t^3) dt \quad (6.7)$$

biçiminde yazılıp integrali alınırsa, yol almada gerekli enerji

$$E_1 = m a_1^2 \frac{t_1^2}{2} + k_0 a_1 \frac{t_1^2}{2} + k_1 a_1^2 \frac{t_1^3}{3} + k_2 a_1^3 \frac{t_1^4}{4} \quad (6.8)$$

olarak bulunur. Bu ifadede (6.6) ilişkisi kullanılarak maksimum seyir hızı v_1 ve hızlanma zamanı t_1 parametrelerine bağlı

$$E_1 = m \frac{v_1^2}{2} + k_0 v_1 \frac{t_1}{2} + k_1 v_1^2 \frac{t_1}{3} + k_2 v_1^3 \frac{t_1}{4} \quad (6.9)$$

enerji ifadesi elde edilir.

$t_1 < t < t_2$ zaman aralığında (sabit hızda hareket durumu) tüm ifadeler 2 indisi ile gösterilmiş olup, Z_2 cer kuvveti

$$Z_2 = T_R = k_0 + k_1 v_1 + k_2 v_1^2 \quad \{v(t) = v_1 = \text{sabit}, \quad \frac{dv}{dt} = 0\} \quad (6.10)$$

ve şebekeden çekilen E_2 enerjisi

$$E_2 = \int_{t_1}^{t_2} Z_2 v_1 dt = (k_0 v_1 + k_1 v_1^2 + k_2 v_1^3) (t_2 - t_1) \quad (6.11)$$

olarak elde edilir. Toplam enerji $E = E_1 + E_2$ olduğundan (6.9) ve (6.11) ifadeleri toplanır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= k_0 t_2, \quad \alpha_2 = \frac{1}{2} m + k_1 t_2, \quad \alpha_3 = k_2 t_2 \\ \alpha_4 &= -\frac{k_0}{2}, \quad \alpha_5 = -\frac{2}{3} k_1, \quad \alpha_6 = -\frac{3}{4} k_2 \end{aligned} \quad (6.12)$$

kısaltmaları ile v_1 , t_1 ve t_2 'ye bağlı toplam enerji ifadesi

$$E = \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_1^2 + \alpha_3 v_1^3 + \alpha_4 v_1 t_1 + \alpha_5 v_1^2 t_1 + \alpha_6 v_1^3 t_1 \quad (6.13)$$

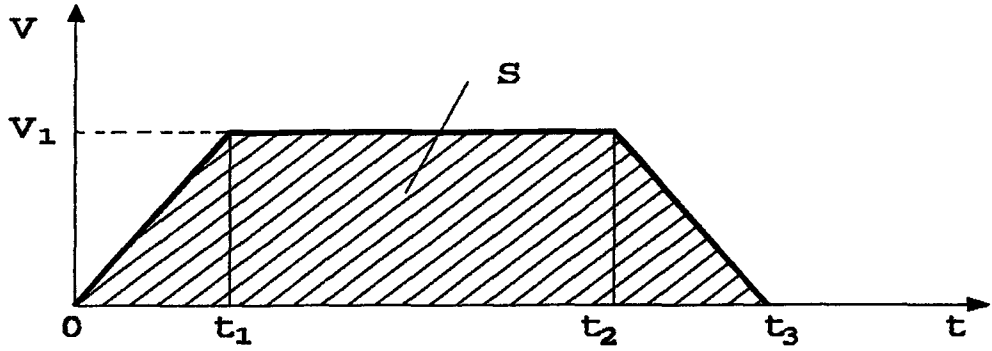
biçiminde elde edilir.

6.2. Faydalı Frenlemenin Yapıldığı Durum

Bu duruma ilişkin hız-zaman diyagramı şekil 6-2'de görülmektedir. Burada,

- $t_1[s]$: sabit hıza erişme zamanı (hızlanma zamanı),
- $t_2[s]$: faydalı frenlemeye başlama zamanı,
- $t_3[s]$: varış zamanı,
- $v_1[m/s]$: maksimum seyir hızı,
- $S[m]$: katedilen yoldur.

Bu çalışma durumu için hız, cer kuvveti ve enerji ifadeleri aşağıda verilmiştir. Ancak burada diğer k_0 ve k_1



Şekil 6-2: Faydalı frenlemeye ilişkin hız-zaman diyagramı

katsayılarına göre değeri çok küçük olan k_2 katsayısı ihmal edilmiştir. Örneğin İstanbul LRT sisteminde v [km/h] boyutunda olmak üzere $k_0 = 1035$, $k_1 = 3.65$, $k_2 = 0.313$ dir.

$0 < t < t_1$ zaman aralığı için

$$Z_1 = m \frac{dv(t)}{dt} + k_0 + k_1 v(t), \quad v(t) = \frac{v_1}{t_1} t, \quad E_1 = \int_0^{t_1} Z_1 v(t) dt \quad (6.14)$$

$t_1 < t < t_2$ zaman aralığı için

$$Z_2 = k_0 + k_1 v_1, \quad v(t) = v_1 = \text{sabit}, \quad E_2 = \int_{t_1}^{t_2} Z_2 v_1 dt \quad (6.15)$$

$t_2 < t < t_3$ zaman aralığı için

$$Z_3 = m \frac{dv(t)}{dt} + k_0 + k_1 v(t), \quad v(t) = \frac{v_1}{t_3 - t_2} (-t + t_3),$$

$$E_3 = \int_{t_2}^{t_3} Z_3 v(t) dt \quad (6.16)$$

biçiminde olup ara işlemlerden sonra, toplam enerji ifadesi

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = -\frac{2}{3} k_1 v_1^2 t_1 + \frac{2}{3} k_1 v_1^2 t_2 + \frac{k_1}{3} t_3 v_1^2 - \frac{k_0}{2} v_1 t_1 + \frac{k_0}{2} v_1 t_2 + \frac{k_0}{2} t_3 v_1 \quad (6.17)$$

biçiminde elde edilir.

6.3. Optimal Çözümlerin Bulunması

Birinci duruma ilişkin (6.13) enerji ifadesi amaç fonksiyonu, S_1 yolu eşitlik kısıtlaması ve t_1 hızlanma zamanı eşitsizlik kısıtlaması olarak değerlendirilirse, aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$f = \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_1^2 + \alpha_3 v_1^3 + \alpha_4 v_1 t_1 + \alpha_5 v_1^2 t_1 + \alpha_6 v_1^3 t_1 \quad (6.18)$$

$$h = S_1 - v_1 t_2 + \frac{1}{2} v_1 t_1 = 0 \quad (6.19)$$

$$g = t_1 \geq 0 \quad (6.20)$$

Bu ifadelere Kuhn-Tucker koşullarına ilişkin (6.1) ilişkileri uygulanırsa

$$\frac{\partial f}{\partial v_1} + \lambda \frac{\partial h}{\partial v_1} + \mu \frac{\partial g}{\partial v_1} = 0 \quad (6.21)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t_1} + \lambda \frac{\partial h}{\partial t_1} + \mu \frac{\partial g}{\partial t_1} = 0 \quad (6.22)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \lambda} + \lambda \frac{\partial h}{\partial \lambda} + \mu \frac{\partial g}{\partial \lambda} = S_1 - v_1 t_2 + \frac{1}{2} v_1 t_1 = 0 \quad (6.23)$$

$$\mu g = \mu t_1 = 0 \quad (6.24)$$

denklem sistemleri elde edilir. Gerekli işlemler yapıldığında (6.21), (6.22), (6.23) ve (6.24) denklemleri sırayla

$$\alpha_1 + 2\alpha_2 v_1 + 3\alpha_3 v_1^2 + \alpha_4 t_1 + 2\alpha_5 v_1 t_1 + 3\alpha_6 v_1^2 t_1 + \lambda \left(-t_2 + \frac{t_1}{2}\right) = 0 \quad (6.25)$$

$$\alpha_4 v_1 + \alpha_5 v_1^2 + \alpha_6 v_1^3 + \lambda \left(\frac{v_1}{2}\right) + \mu = 0 \quad (6.26)$$

$$S_1 - v_1 t_2 + \frac{1}{2} v_1 t_1 = 0 \quad (6.27)$$

$$\mu t_1 = 0 \quad (6.28)$$

biçiminde elde edilir.

Bu denklem sistemlerinin çözümünden, (6.12) kısaltmaları da göz önünde bulundurularak

$$\mu = v_1^2 \left(-\frac{1}{3} k_1 - \frac{m}{2t_2} \right) + v_1^3 \left(-\frac{3}{4} k_2 \right) \quad (6.29)$$

elde edilir. Ayrıca $v_1 \geq 0$, $m > 0$, $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, $t_2 > 0$ olduğundan $\mu < 0$ bulunur. Bu durumda çözüm minimumdur [35,36]. (6.27) denklemini $\mu \neq 0$ ile çarpılır ve gerekli işlemler yapılırsa

$$S_1 \mu - v_1 t_2 \mu + \frac{1}{2} v_1 t_1 \mu = 0, \quad \mu \neq 0, \quad \mu t_1 = 0 \quad (6.30)$$

$$v_1^* = \frac{S_1}{t_2}, \quad t_1^* = 0$$

("*" optimal çözümü belirtmek üzere) elde edilir..

ikinci duruma ilişkin (6.17) enerji amaç fonksiyonu, S toplam yola ait eşitlik kısıtlaması ve pozitif zaman eşitsizlik kısıtlamaları aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$f = -\frac{2}{3} k_1 v_1^3 t_1 + \frac{2}{3} k_1 v_1^3 t_2 + \frac{k_1}{3} t_3 v_1^3 - \frac{k_0}{2} v_1 t_1 + \frac{k_0}{2} v_1 t_2 + \frac{k_0}{2} t_3 v_1 \quad (6.31)$$

$$h = 2S + v_1 (t_1 - t_2 - t_3) = 0 \quad (6.32)$$

$$g_1 = t_1 \geq 0$$

$$g_2 = t_2 - t_1 \geq 0 \quad (6.33)$$

$$g_3 = t_3 - t_2 \geq 0$$

Bu denklemlere Kuhn-Tucker koşullarına ilişkin (6.1) denklemleri uygulanır ve gerekli işlemler yapılırsa

$$-\frac{4}{3} k_1 v_1 t_1 + \frac{4}{3} k_1 v_1 t_2 + \frac{2}{3} k_1 t_3 v_1 - \frac{k_0}{2} t_1 + \frac{k_0}{2} t_2 + \frac{k_0}{2} t_3 + \lambda (t_1 - t_2 - t_3) = 0 \quad (6.34)$$

$$-\frac{2}{3} k_1 v_1^2 - \frac{k_0}{2} v_1 + \lambda v_1 + \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (6.35)$$

$$\frac{2}{3} k_1 v_1^2 + \frac{k_0}{v_1} + \lambda (-v_1) + \mu_2 - \mu_3 = 0 \quad (6.36)$$

$$2S + v_1 (t_1 - t_2 - t_3) = 0 \quad (6.37)$$

$$\begin{aligned} \mu_1 t_1 &= 0 & \mu_1 &\leq 0 \\ \mu_2 (t_2 - t_1) &= 0 & \mu_2 &\leq 0 \\ \mu_3 (t_3 - t_2) &= 0 & \mu_3 &\leq 0 \end{aligned} \quad (6.38)$$

denklem sistemleri elde edilir. (6.34) denkleminden λ çözülerek $\mu_2=0$ çözümü için (6.35) ve (6.36) denklemleri kullanılırsa

$$\mu_1 = -\frac{2}{3} k_1 v_1^2 \left(1 + \frac{t_3}{t_1 - t_2 - t_3}\right), \quad \mu_3 = -\frac{2}{3} k_1 v_1^2 \left(\frac{t_2}{t_2 + t_3}\right) \quad (6.39)$$

bulunur.

$t_1 \geq 0$, $t_2 \geq 0$, $t_3 \geq 0$, $v_1 \geq 0$, $k_1 \geq 0$ olduğundan $\mu_1 < 0$, $\mu_2 < 0$ bulunur ve çözümlerin minimum olduğu sonucuna varılır [35,36].

(6.37) ve (6.38) denklemlerinden

$$t_1^* = t_s^* = 0, \quad t_2^* = t_3, \quad t_b^* = t_3 - t_2 = 0, \quad v_1^* = \frac{S}{t_2} \quad (6.40)$$

optimal çözümü elde edilir. Burada, t_s yol alma zamanı, t_b frenleme zamanıdır.

6.3. Optimal Çözümlerin Değerlendirilmesi

Kuramsal olarak her iki durumda da çekilen enerjinin minimum olması için yol alma ve frenleme ivmelerinin sonsuz olması gerektiği (6.30) ve (6.40) çözümlerinden açıkça görülmektedir. Pratikte gerek yol almada gerek frenlemede patinajın olmaması için Z cer kuvvetinin $Z \leq \mu N$ olması gerekir. Burada N dingil basıncını, μ tekerlek ile ray arasındaki sürtünme katsayısını göstermektedir. Tüm dingillerin motorlu olması durumunda, düz yolda ($N=G$)

$$Z \leq \mu G = \mu mg, \quad Z - T_R = ma \quad (6.41)$$

ilişkileri geçerlidir. Cer kuvvetinin minimum olduğu $T_R=0$ durumunda

$$Z = ma = \leq \mu mg \text{ yada } a \leq \mu g \quad (6.42)$$

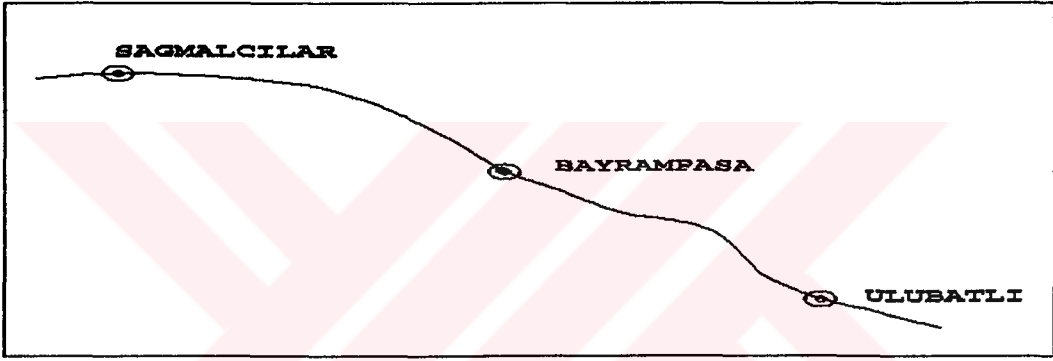
olmalıdır. Patinaj sınırlaması nedeniyle a ivmesi belirli bir değer üstüne çıkamaz. Ayrıca konfor yönünden de bir ivme sınırlaması getirilmesi gerekir. Buna göre yukarıda

matematiksel olarak elde edilen bu optimal çözümlerin üst sınırını patinaj ve konfor kısıtlamaları belirler. Bu kısıtlamalar optimal çözüme ilişkin denklem sistemine eklenerek çözümler aranabilir. Bu durumda optimal çözüme ilişkin denklem sistemi çok karmaşık bir hale gelir. Amacımız, genellikle grafiksel olarak verilen çözümü matematiksel olarak kanıtlamak olduğundan daha genel kısıtlamalar için çözüm aranmamıştır. Sonuç olarak belirli bir yolu belirli bir zamanda minimum enerjiyle katetmek için patinaj ve konfor koşullarının sınırladığı en yüksek ivmeyle yol almak ve faydalı frenlemede en yüksek frenleme ivmesiyle yavaşlayarak durmak gerekmektedir. Bir ulaşım aracının belirli bir yolu belirli bir zamanda minimum enerjiyle katetmesi için, bu aracın patinaj ve konfor koşullarının sınırladığı maksimum ivme ile hızlanmasını ve frenlemesini sağlayacak kontrol algoritmalarının gerçekleştirilmesi gerekir. Tahrik motorları PI kontrolörleri ile kontrol edilen İstanbul LRT sisteminde tam bir enerji optimizasyonu yapıldığı söylenemez. Ayrıca faydalı frenlemede kazanılan enerjinin, diğer araçlarda kullanılabilmesi için trafiğin uygun bir şekilde düzenlenmesi gerekir.

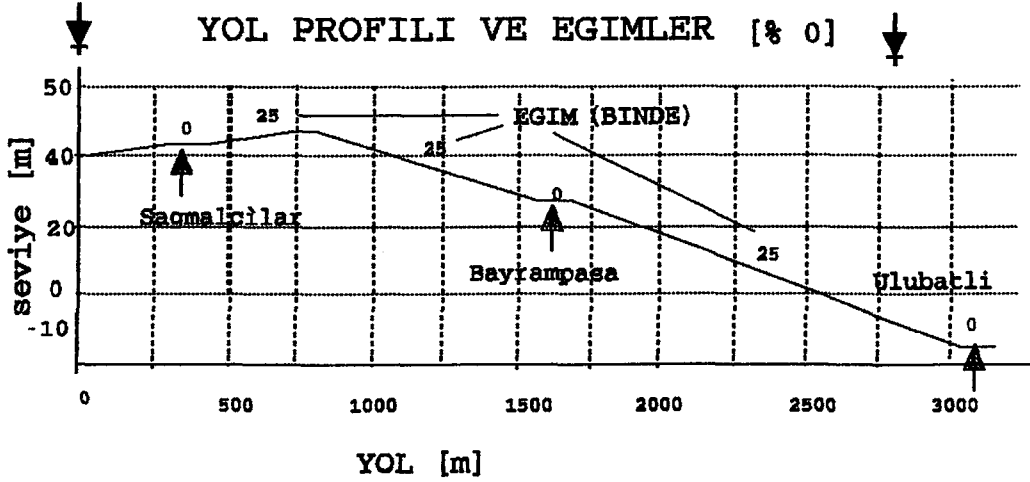
BÖLÜM 7

SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışmada, geliştirilmiş bulunan simülasyon programı, İstanbul LRT sisteminin, Sağmalcılar-Ulubatlı arasındaki yol güzergahına (şekil 7-1) uygulanmıştır. Bu bölgeye ilişkin yol profili ve eğimler şekil 7-2' de verilmiştir.

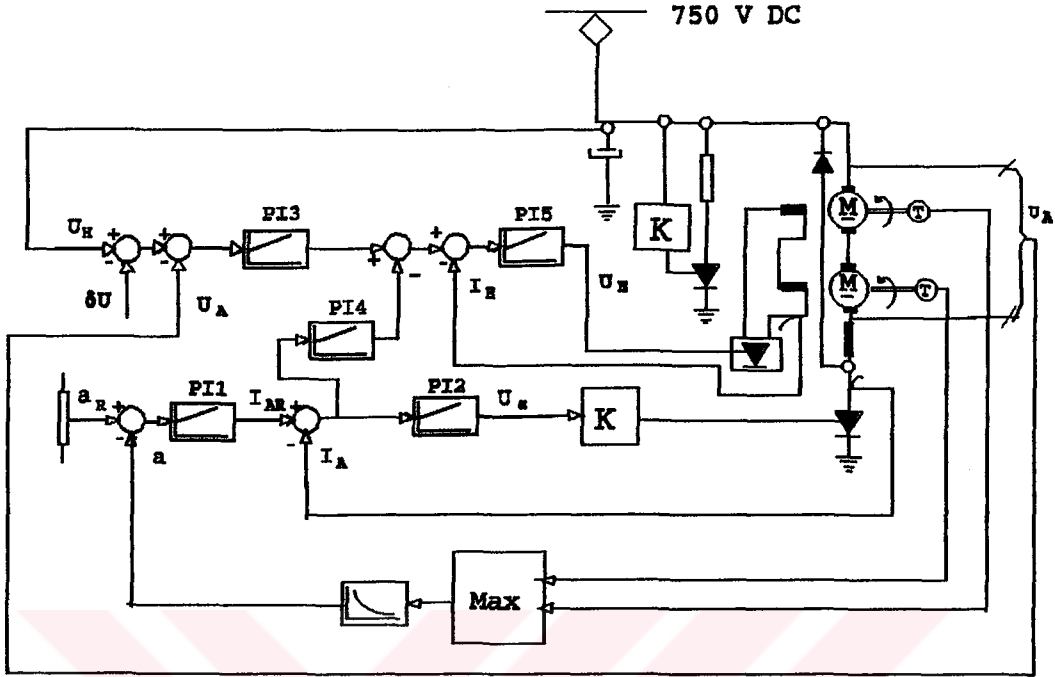


Şekil 7-1: Yol güzergahı

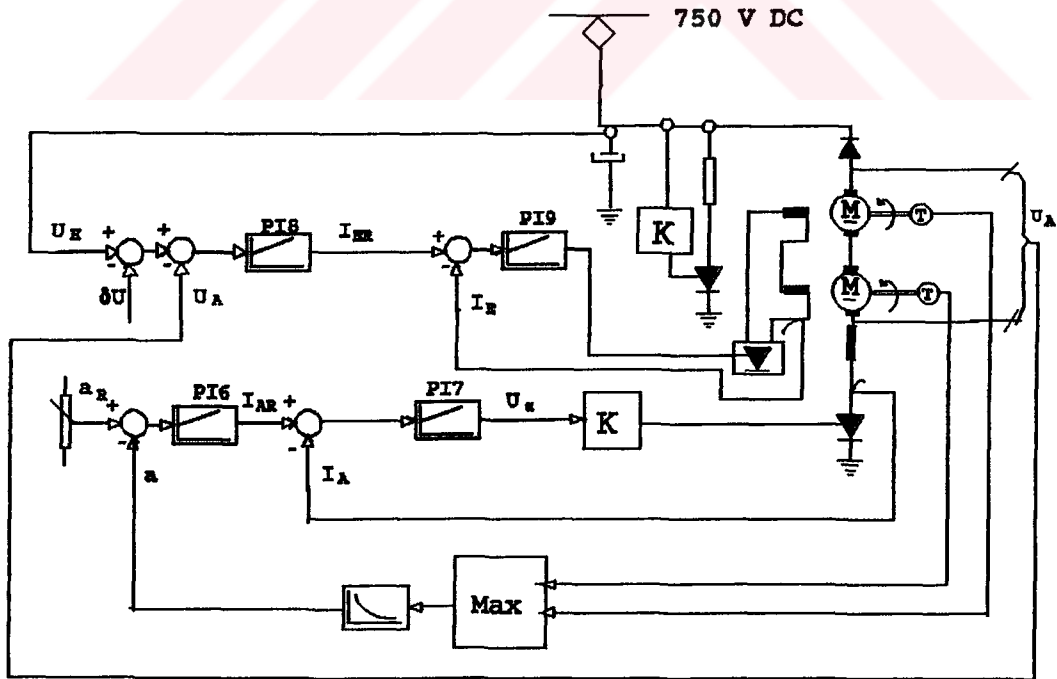


Şekil 7-2: Yol profili ve eğimler

7.1. Sistemin Kontrolü



Şekil 7-3: Motor çalışma modunda kontrol çevrimleri



Şekil 7-4: Fren çalışma modunda kontrol çevrimleri

İstanbul LRT sisteminde, motor (şekil 7-3) ve fren (şekil 7-4) olmak üzere iki değişik çalışma modu bulunmaktadır. Her modun tahrik düzeni bağlantı biçimi ve kontrol düzeneği farklıdır. Simülasyon programında, iki istasyon arasında hareket eden bir katarın, belirli bir ivmeyle hızlanması ve belirli bir ivmeyle frenlenmesi için gerekli kontrol çevrimleri ve kontrolörlere ilişkin yazılımlar da bulunur. Motor modunda çalışmada, bir vagondaki bir motorlu bojinin kontrolü şekil 7-3'de, frenleme modunda çalışmada şekil 7-4'de verilen kontrol çevrimlerine göre gerçekleştirilmektedir.

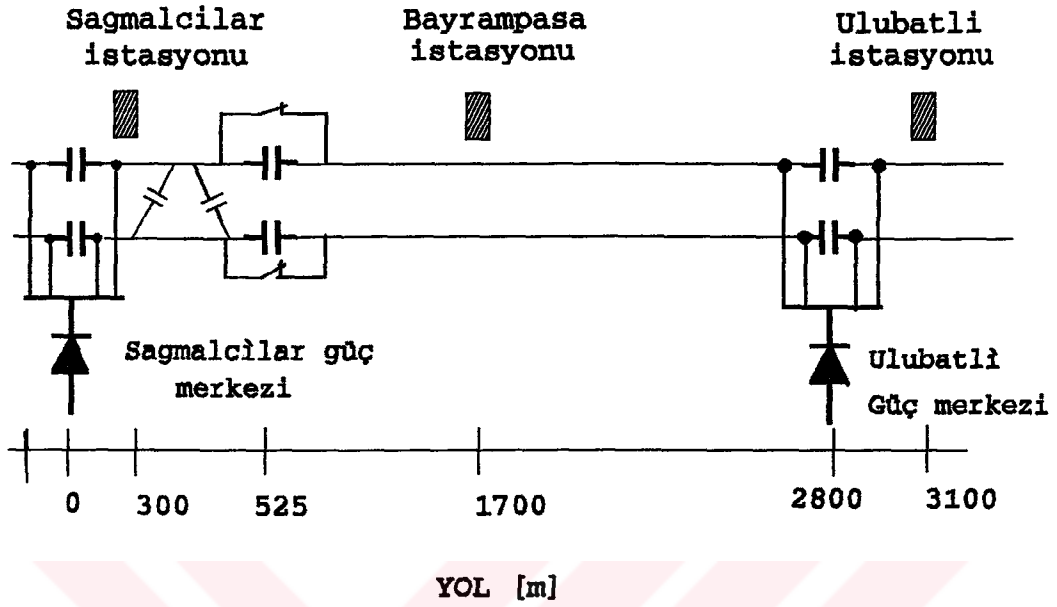
7.2. Simülasyon Programı Uygulanan Çalışma Durumlarının Tanımlanması ve Simülasyon Sonuçları

7.2.1. Üç Vagonlu Dört Katarın Aynı Anda Yol Alması ve Güç Merkezlerinin Paralel Çalışması Durumu

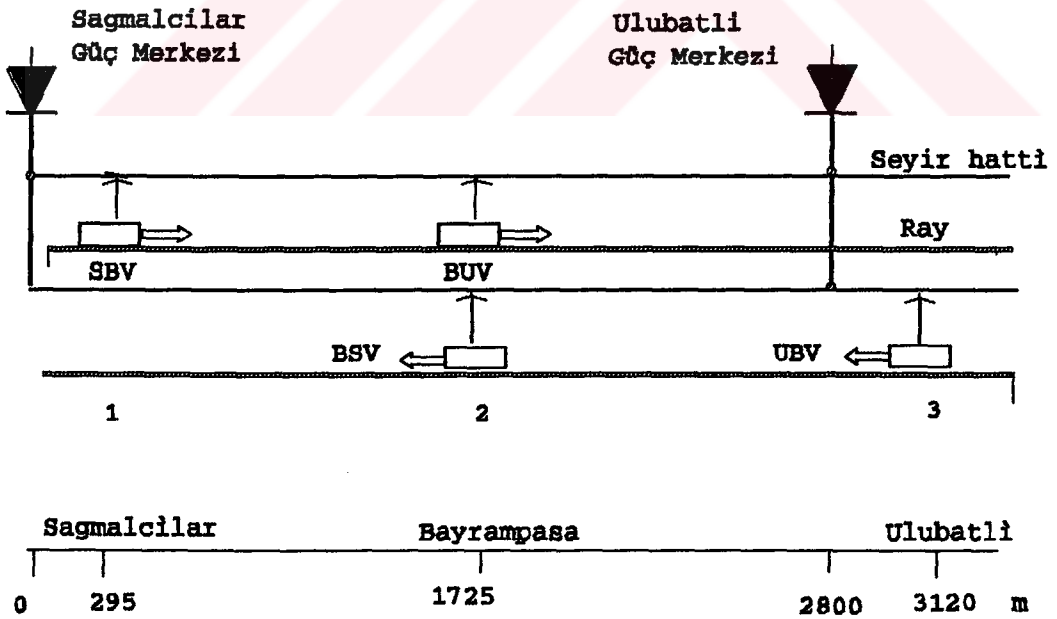
İstasyon ve güç merkezleri yerleşim planı şekil 7-5'de gösterilen ulaşım sisteminde, iki güç merkezinin paralel çalıştığı ve şekil 7-6'de konumları ve hareket yönleri gösterilen katarların aynı anda yol almaya başladıkları aydınlatma ve ısıtma sisteminin devrede olduğu varsayılmıştır. Katarlar, güç besleme merkezleri ve kataner sistemine ilişkin diğer bilgiler aşağıda verilmiştir.

Güç besleme merkezleri (Sağmalcılar ve Ulubatlı):

Anma gerilimi:	750 V
Boşta kaynak çıkış gerilimi:	820 V
Kaynak çıkış direnci:	0.007 ohm
Anma gücü:	4000 kW



Şekil 7-5: İstasyon ve güç merkezleri yerleşim planı



Şekil 7-6: Katar konum ve hareket yönleri

Kataner sistemi (Sağmalcılar-Ulubatlı):

Yol uzunluğu: 3100 m
Seyir hattı direnci: 0.076 ohm/km
ray direnci: 0.01 ohm/km
Katarlar (BUV,UBV,BSV,UBV)
Vagon sayısı: 3
Vagon kütlesi: 29 ton
Bir vagondaki yolcu sayısı: 180 kişi
Toplam vagon kütlesi: 42.5 ton
Vagon başına aydınlatma ve ısıtma gücü: 40 kW

Çalışma koşulları:

Hızlanma ivmesi: 0.75 m/s^2
Frenleme ivmesi: 0.75 m/s^2

Güç merkezlerine ilişkin simülasyon sonuçları:

Sağmalcılar güç merkezi kaynak gerilimi (şekil 7-7)
kaynak akımı şekil (7-8), çıkış gücü (şekil 7-9);
Ulubatlı güç merkezi kaynak gerilimi (şekil 7-10),
kaynak akımı (şekil 7-11), çıkış gücü (şekil 7-12)'de verilmiştir.

Katarlara ilişkin simülasyon sonuçları:

Sağmalcılar-Bayrampaşa (SBV) katarına ilişkin, kataner gerilimi (şekil 7-13), katar akımı (şekil 7-14) ve hız-zaman diyagramı (şekil 7-15)'de;

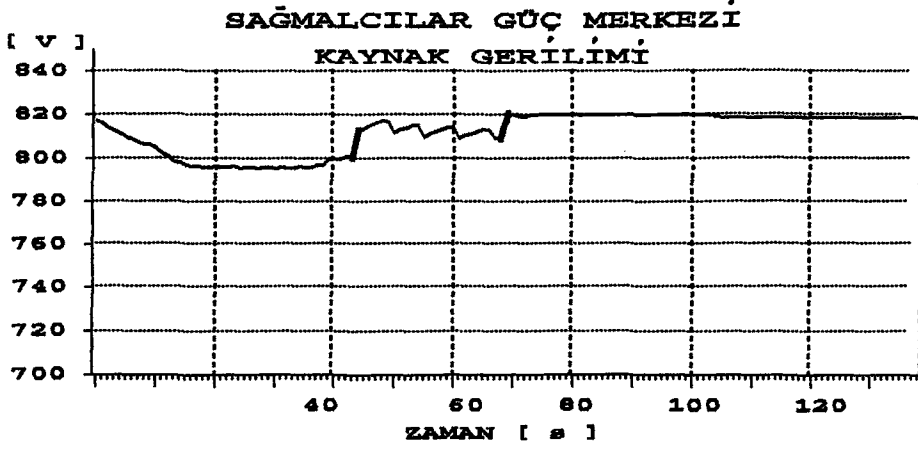
Bayrampaşa-Ulubatlı (BUV) katarına ilişkin kataner gerilimi (şekil 7-16), katar akımı (şekil 7-17) ve hız-zaman diyagramı (şekil 7-18)'de;

Ulubatlı-Bayrampaşa (UBV) katarına ilişkin kataner gerilimi (şekil 7-19), katar akımı (şekil 7-20) ve hız-zaman

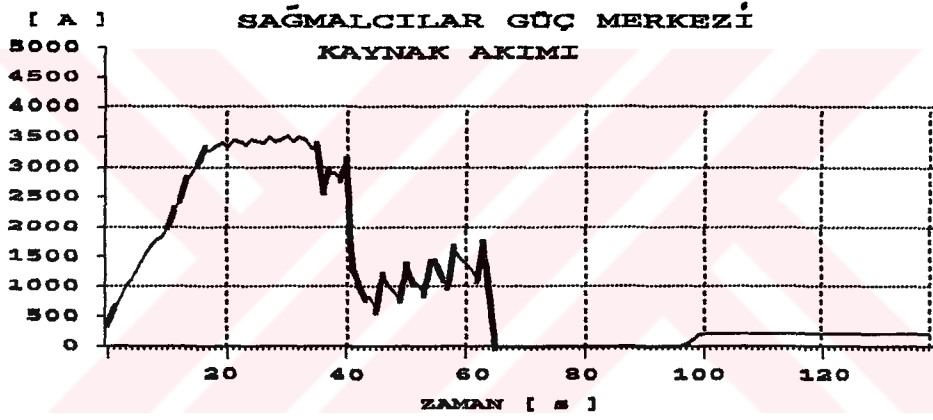
diyagramı (şekil 7-21)'de;

Bayrampaşa-Sağmalcılar (BSV) katarına ilişkin kataner gerilimi (şekil 7-22), katar akımı (şekil 7-23) ve hız-zaman diyagramı (şekil 7-24)'de görülmektedir.

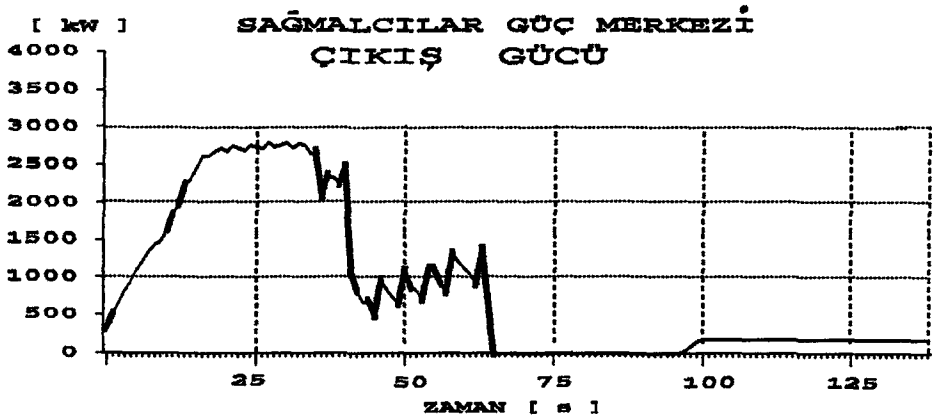




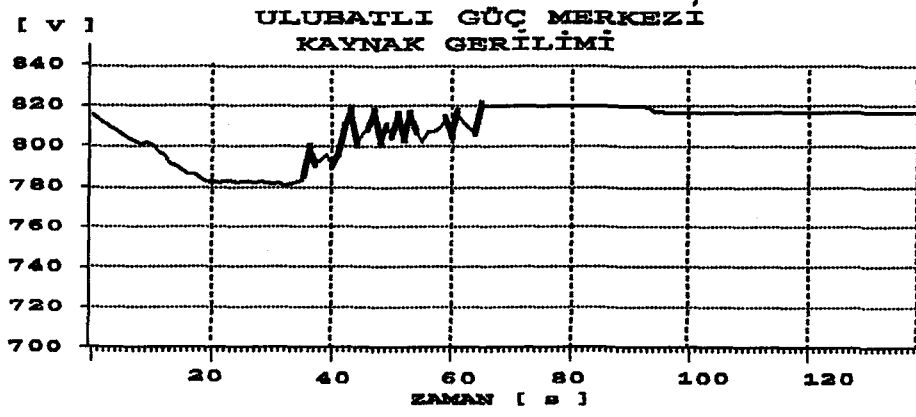
Şekil 7-7



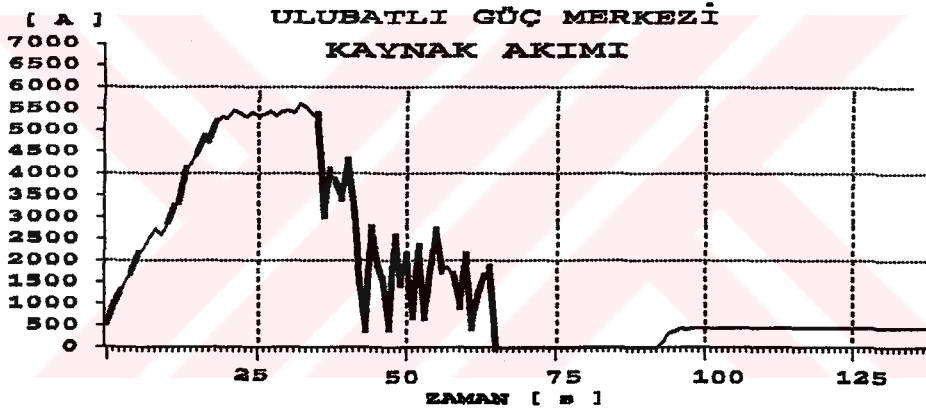
Şekil 7-8



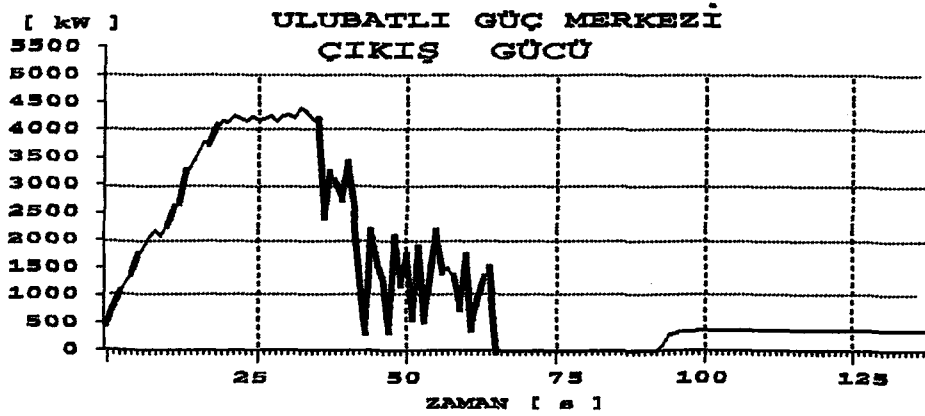
Şekil 7-9



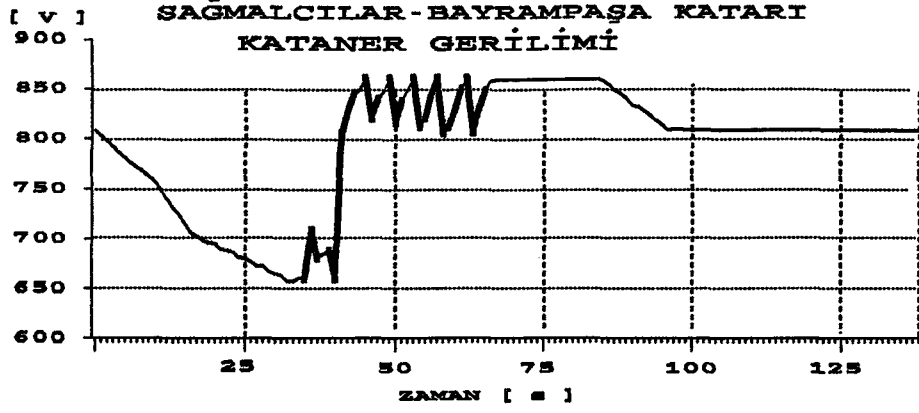
Şekil 7-10



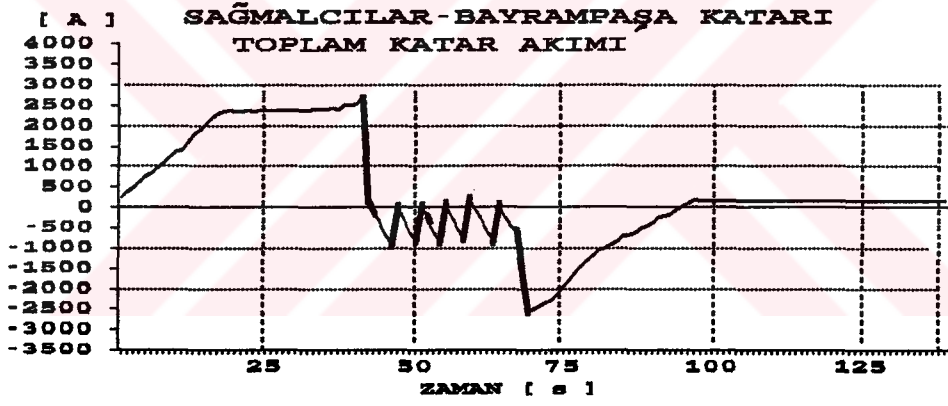
Şekil 7-11



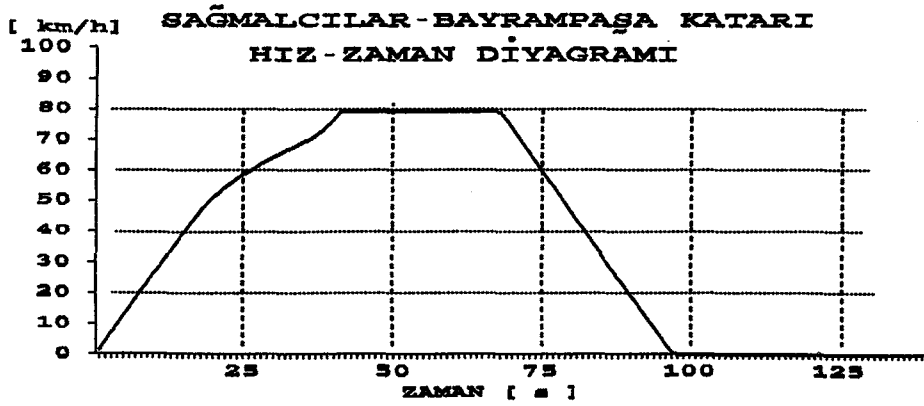
Şekil 7-12



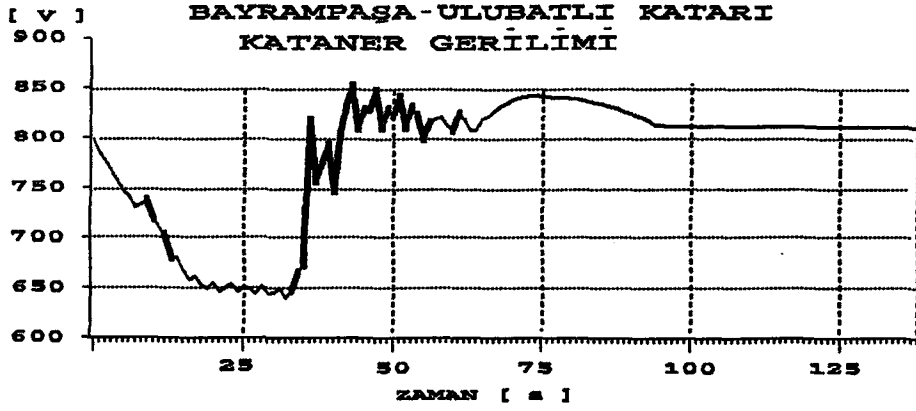
Şekil 7-13



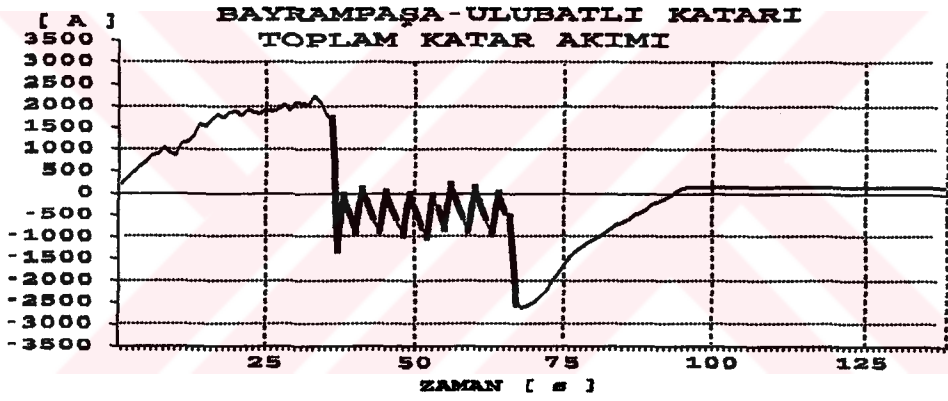
Şekil 7-14



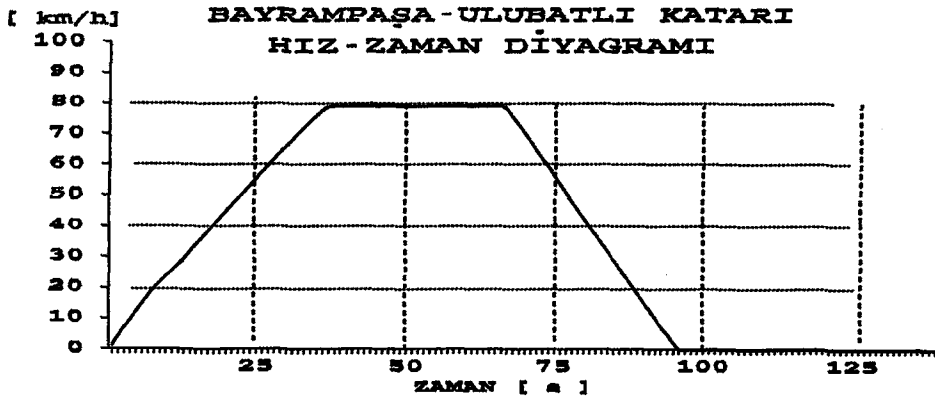
Şekil 7-15



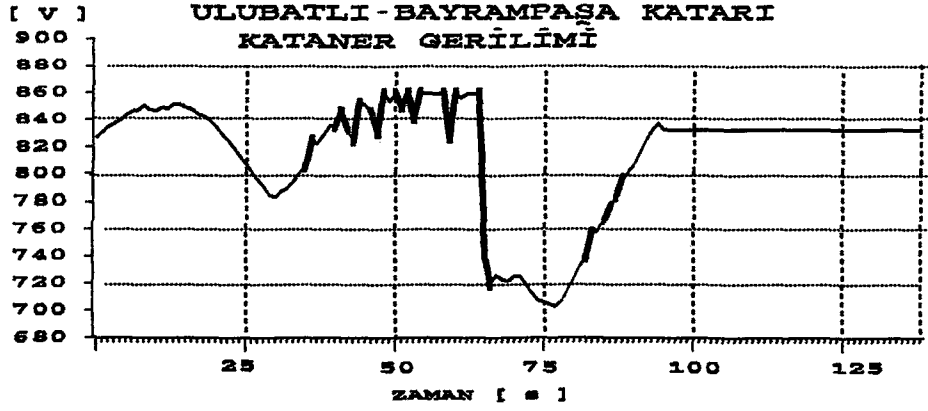
Şekil 7-16



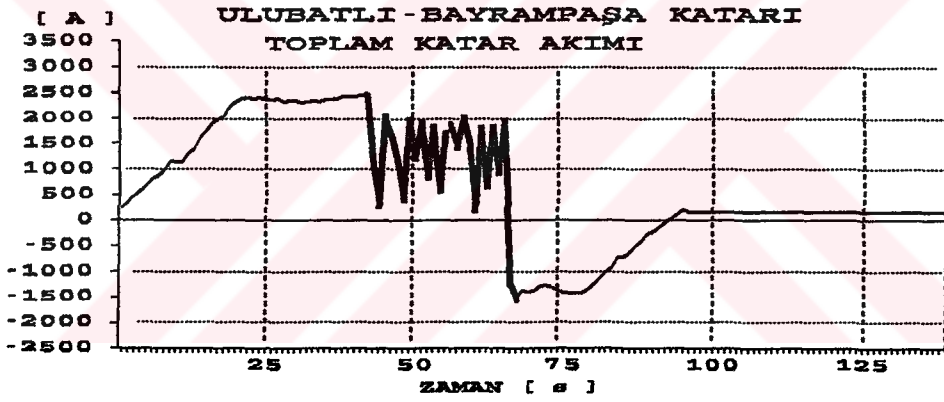
Şekil 7-17



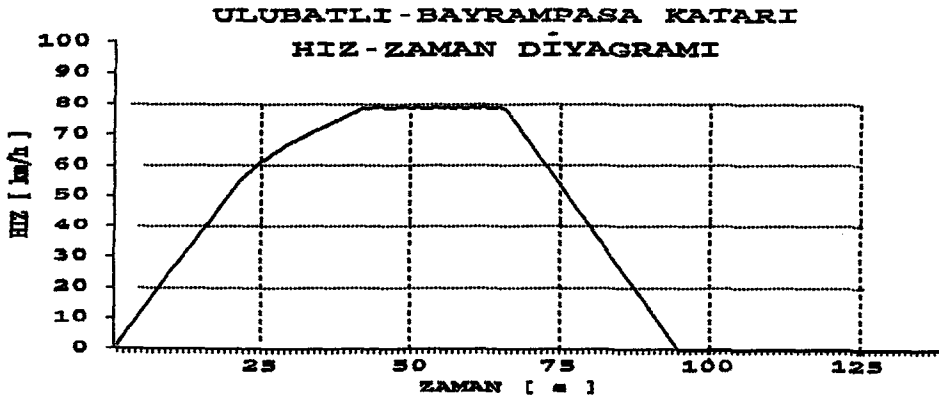
Şekil 7-18



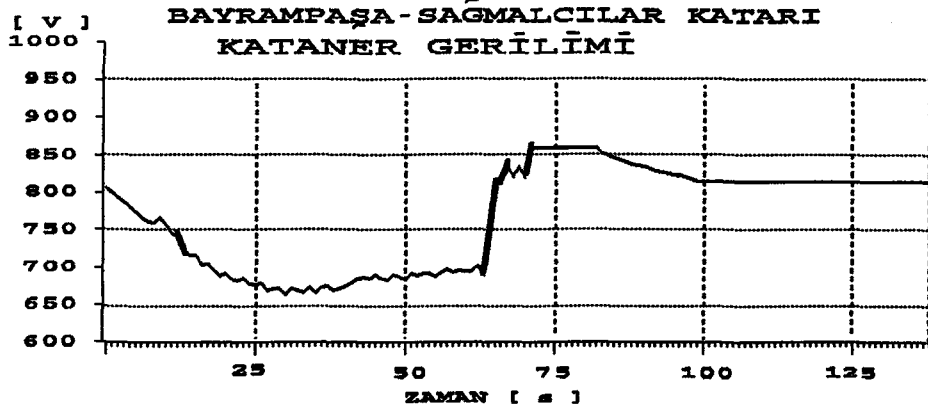
Şekil 7-19



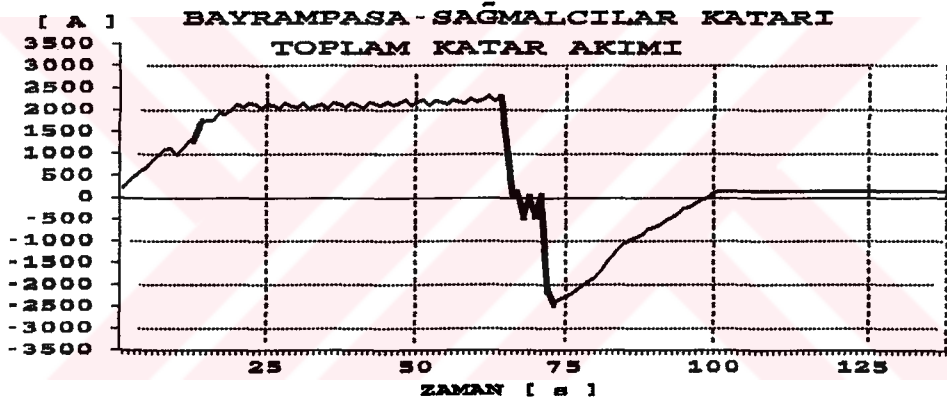
Şekil 7-20



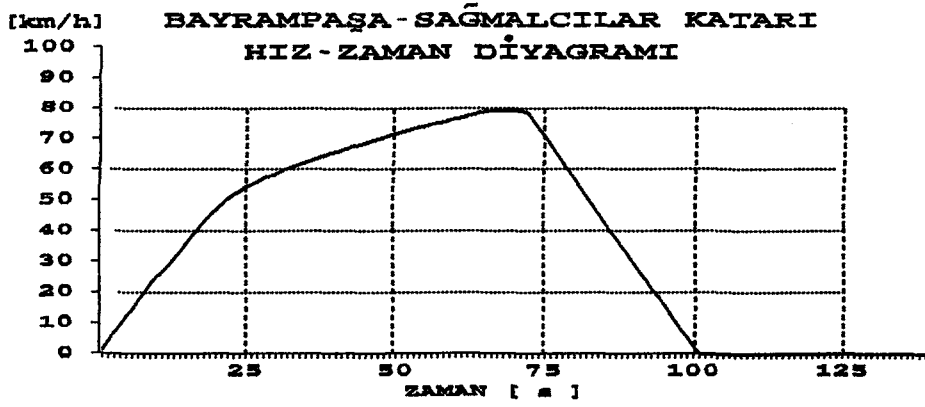
Şekil 7-21



Şekil 7-22



Şekil 7-23



Şekil 7-24

7.2.2. Üç vagonlu dört katarın aynı anda yol alması ve tek güç merkezinden beslenmesi durumu

İstasyon ve güç merkezleri yerleşim planı şekil 7-25' de gösterilen ulaşım sisteminde, sistemin yalnız bir güç merkezinden beslendiği ve şekil 7-26'de konumları ve hareket yönleri gösterilen katarların aynı anda yol almaya başladıkları, aydınlatma ve ısıtma sisteminin devrede olduğu varsayılmıştır. Katarlar, güç besleme merkezleri ve kataner sistemine ilişkin bilgiler aşağıdaki verilmiştir.

Güç besleme merkezi: Ulubatlı (bölüm 7.2.1 verilen değerlerle aynı)

Kataner sistemi (Bayrampaşa-Ulubatlı):

Yol uzunluğu:	2830 m
Seyir hattı direnci:	0.076 ohm/km
Ray direnci:	0.01 ohm/km

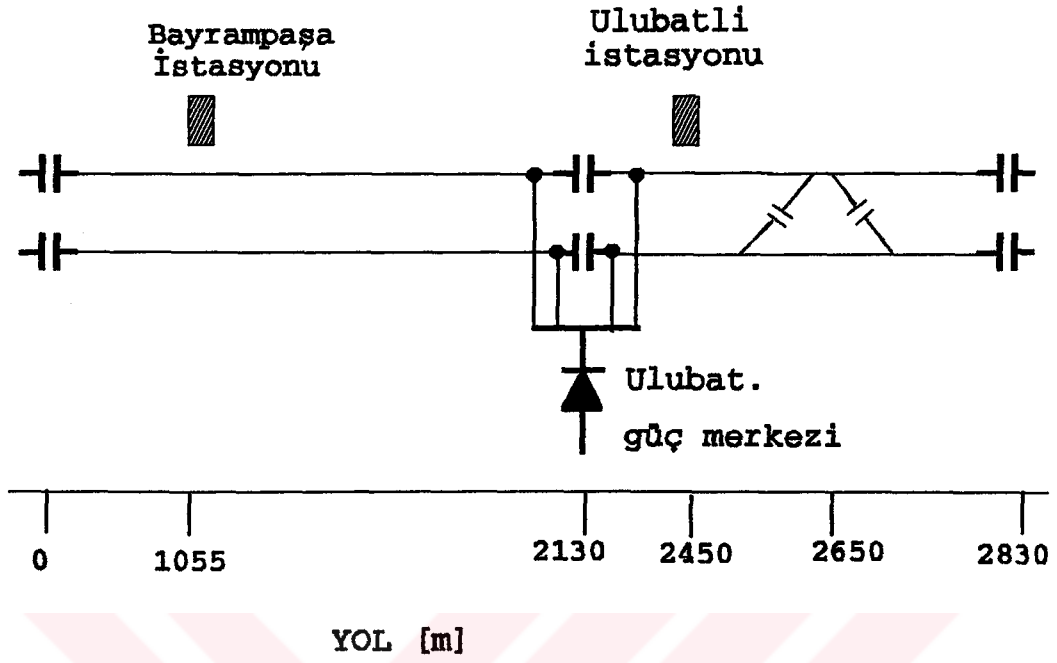
Katarlar (BUV,UBV,BSV,UBV)

Vagon sayısı:	3
Vagon kütlesi:	29 ton
Bir vagondaki yolcu sayısı:	296 kişi (aşırı yük)
Toplam vagon kütlesi:	51.2 ton

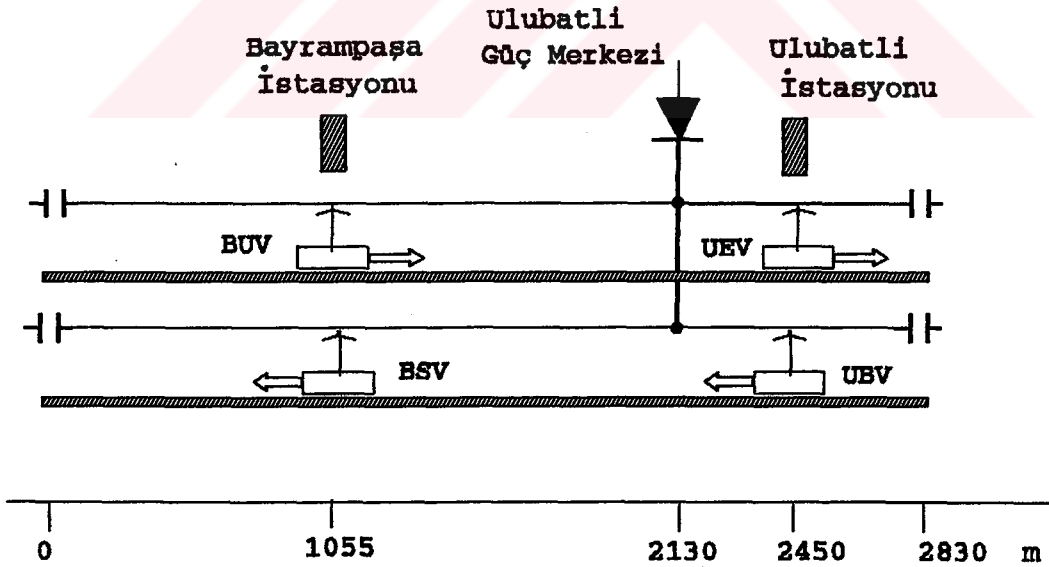
Vagon başına toplam ısıtma ve aydınlatma gücü: 40 kW

Çalışma koşulları:

Hızlanma ivmesi:	0.75 m/s ²
Frenleme ivmesi:	0.75 m/s ²



Şekil 7-25: İstasyon ve güç merkezi yerleşim planı



Şekil 7-26: Katar konum ve hareket yönleri

Güç merkezine ilişkin simülasyon sonuçları:

Ulubatlı güç merkezi kaynak gerilimi (şekil 7-27),
kaynak akımı (şekil 7-28), çıkış gücü (şekil 7-29)'da
verilmiştir.

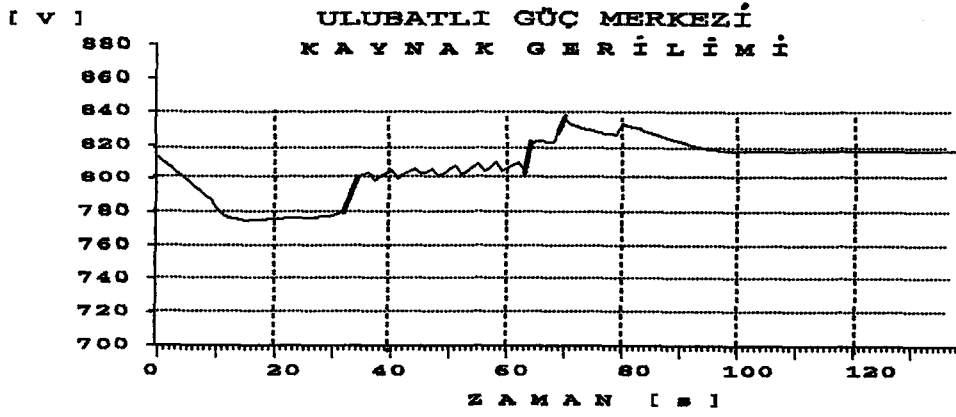
Katarlara ilişkin simülasyon sonuçları:

Ulubatlı-Emniyet (UEV) katarına ilişkin, kataner gerilimi,
şekil 7-30, katar akımı şekil 7-31 ve hız-zaman diyagramı
şekil 7-32'de

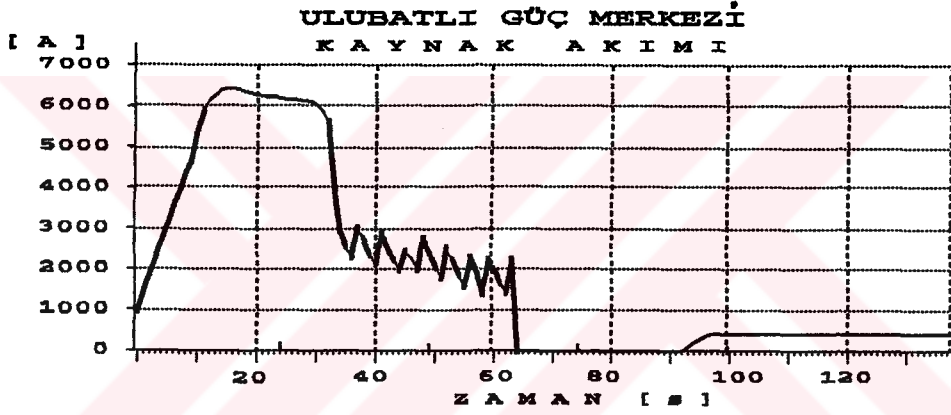
Bayrampaşa-Ulubatlı (BUV) katarına ilişkin kataner gerilimi
şekil 7-33, katar akımı şekil 7-34 ve hız-zaman diyagramı
şekil 7-35'de

Ulubatlı-Bayrampaşa (UBV) katarına ilişkin kataner
gerilimi,şekil 7-36, katar akımı şekil 7-37 ve hız-zaman
diyagramı şekil 7-38'de

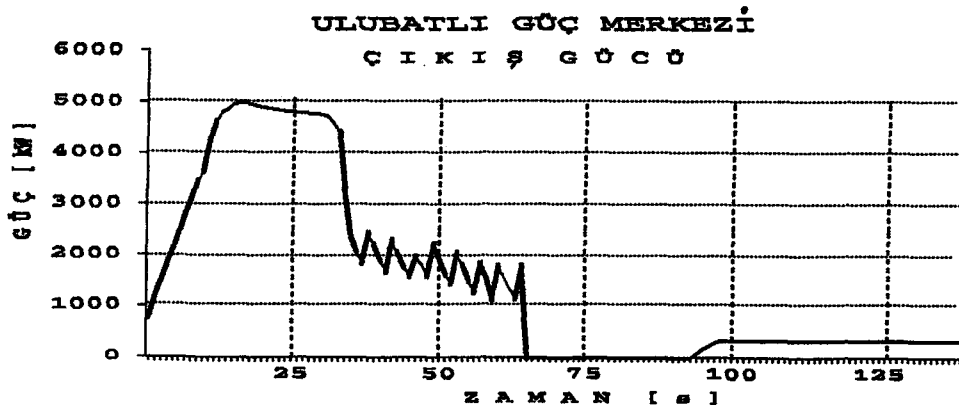
Bayrampaşa-Sağmalcılar (BSV) katarına ilişkin kataner
gerilimi,şekil 7-39, katar akımı şekil 7-40 ve hız-zaman
diyagramı şekil 7-41'de görülmektedir.



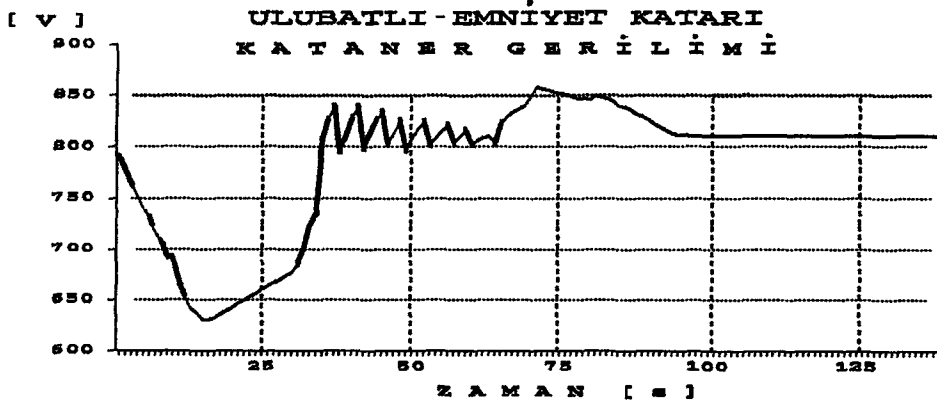
Şekil 7-27



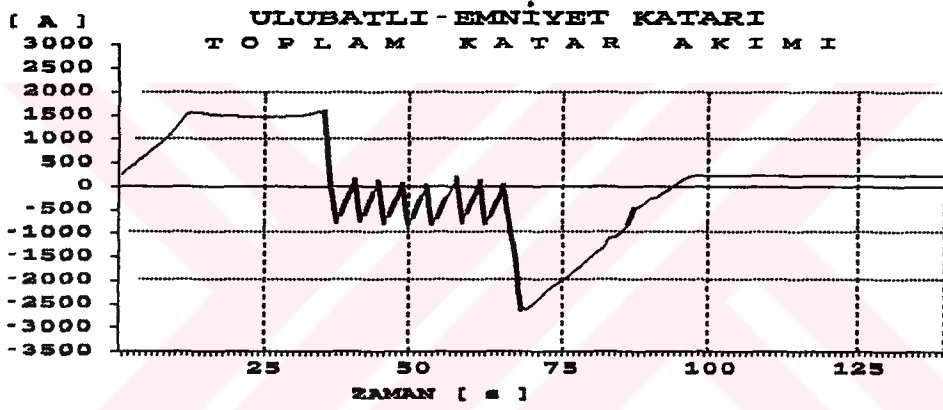
Şekil 7-28



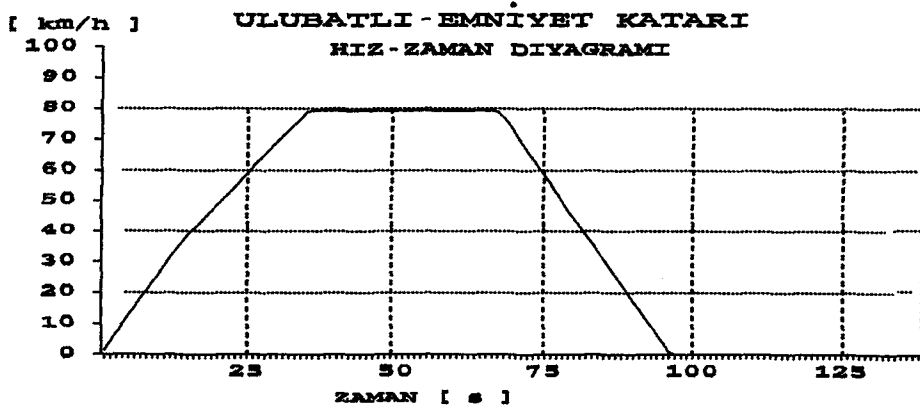
Şekil 7-29



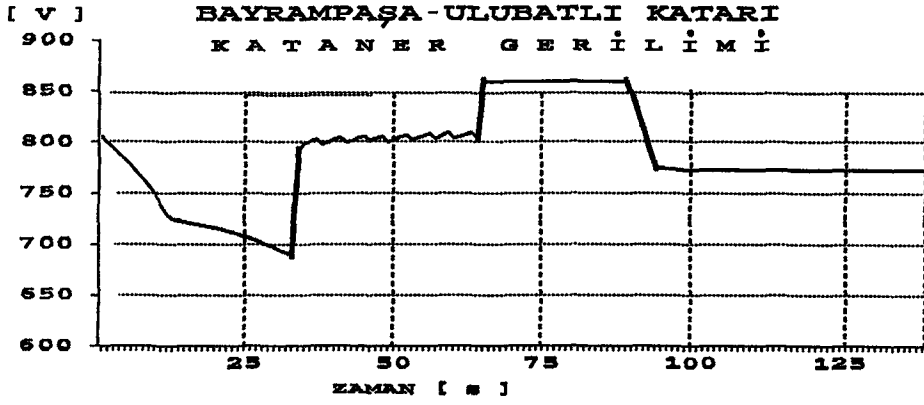
Şekil 7-30



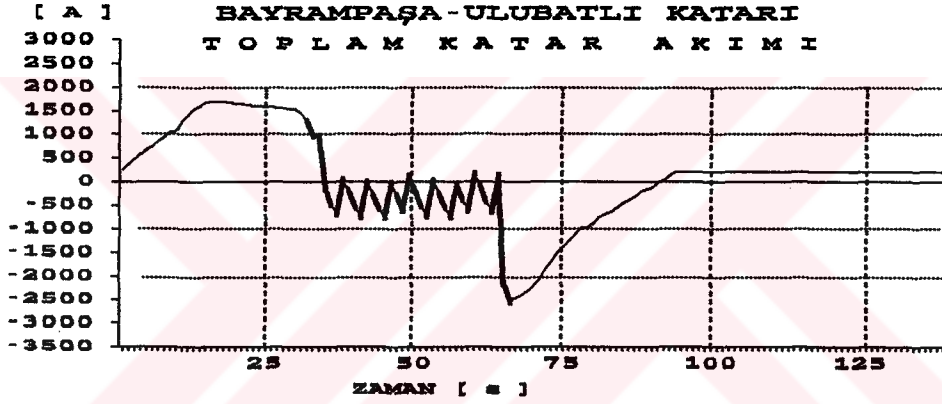
Şekil 7-31



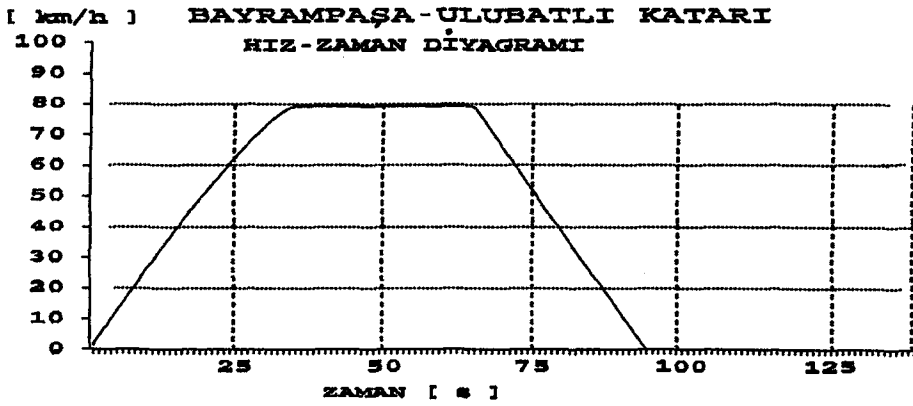
Şekil 7-32



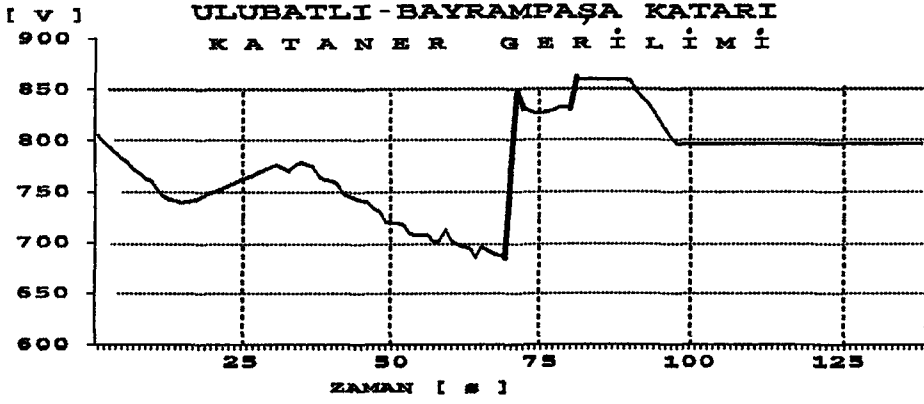
Şekil 7-33



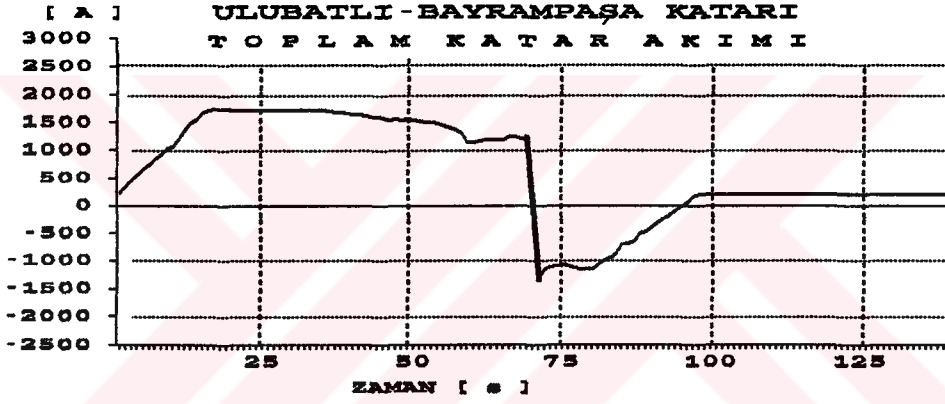
Şekil 7-34



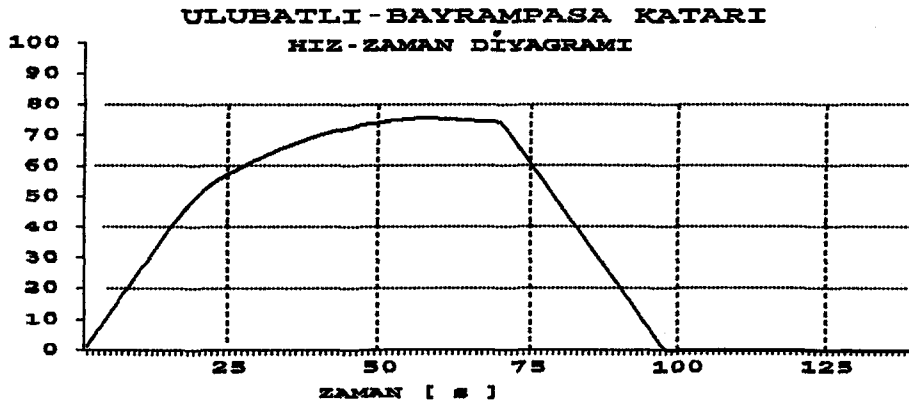
Şekil 7-35



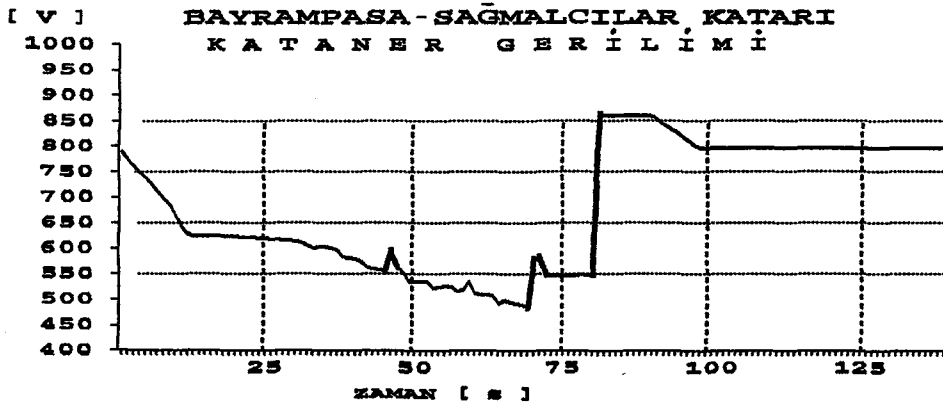
Şekil 7-36



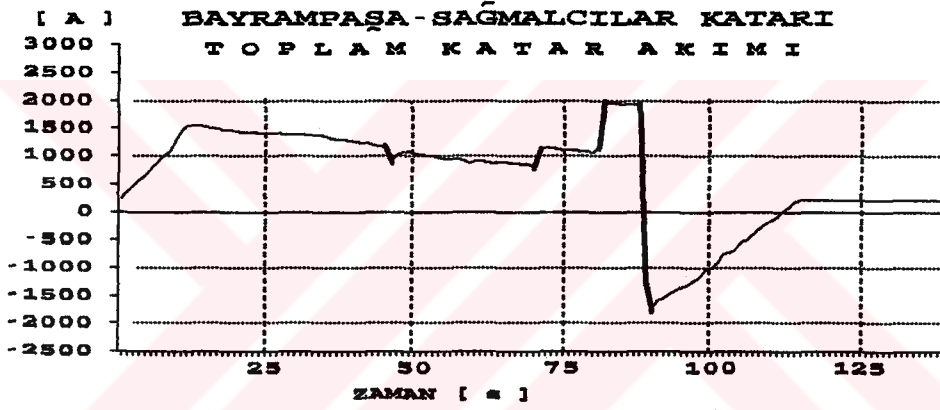
Şekil 7-37



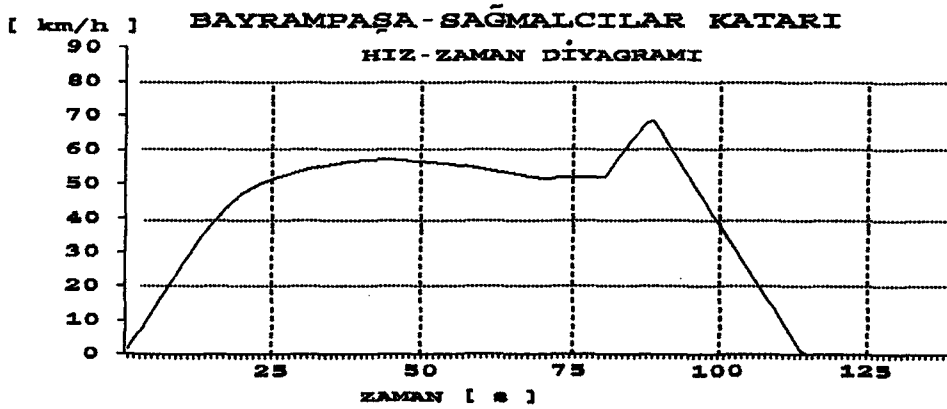
Şekil 7-38



Şekil 7-39



Şekil 7-40



Şekil 7-41

7.2.3.Üç vagonlu bir katarın tek başına hareket etmesi durumu

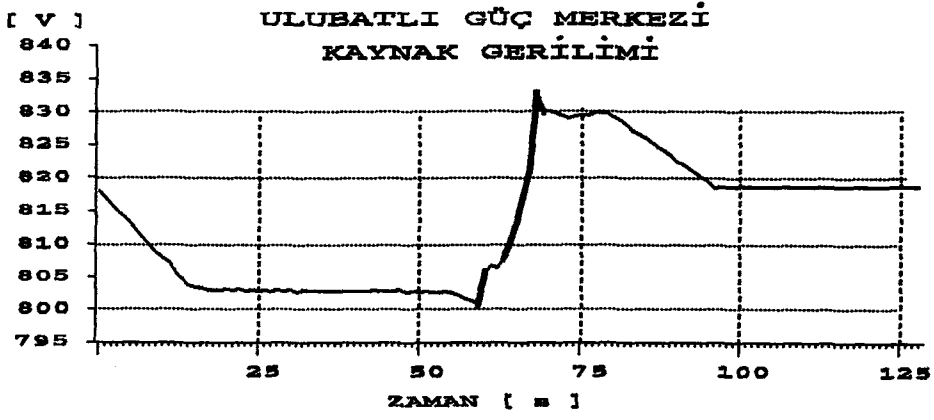
İstasyon ve güç merkezleri yerleşim planı şekil 7-25' de gösterilen ulaşım sisteminde, Sistemin yalnız bir güç merkezinden beslendiği ve şekil 7-26'de konumları ve hareket yönleri gösterilen katarlardan yalnız Ulubatlı-Bayrampaşa (BSV) katarının çalıştığı, diğer katarların aydınlatma ve ısıtma sistemlerinin devrede olduğu varsayılmıştır. Katarlar, güç besleme merkezleri ve kataner sistemine ilişkin diğer bilgiler bölüm 7.2.2.'de verildiği gibidir.

Güç merkezine ilişkin simülasyon sonuçları:

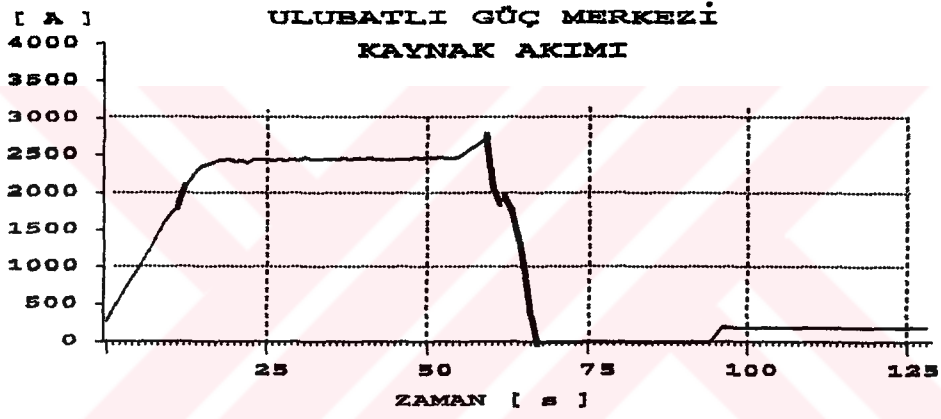
Ulubatlı güç merkezi kaynak gerilimi (şekil 7-42), kaynak akımı (şekil 7-43), çıkış gücü (şekil 7-44)'de görülmektedir.

Ulubatlı-Bayrampaşa (UBV) katarına ilişkin simülasyon sonuçları:

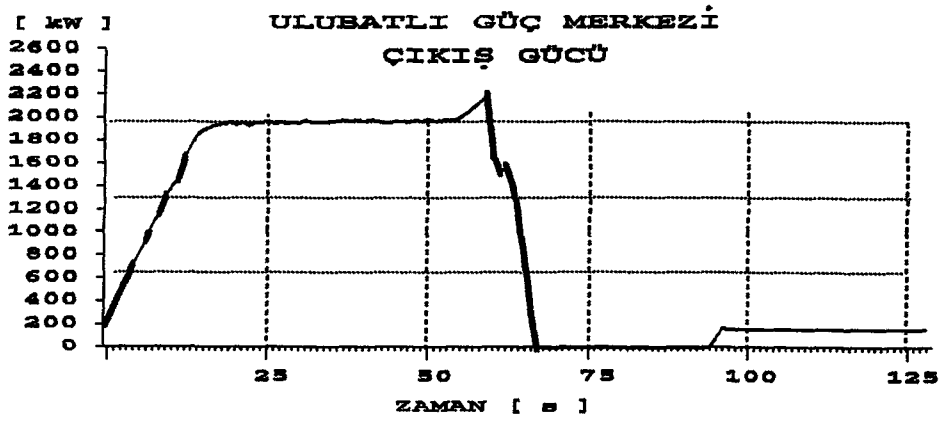
Kataner gerilimi, şekil 7-45, katar akımı şekil 7-46 ve hız-zaman diyagramı şekil 7-47'de görülmektedir.



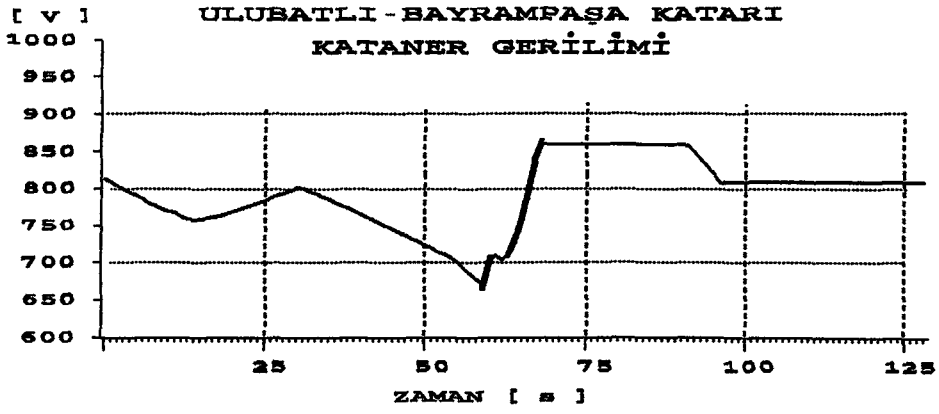
Şekil 7-42



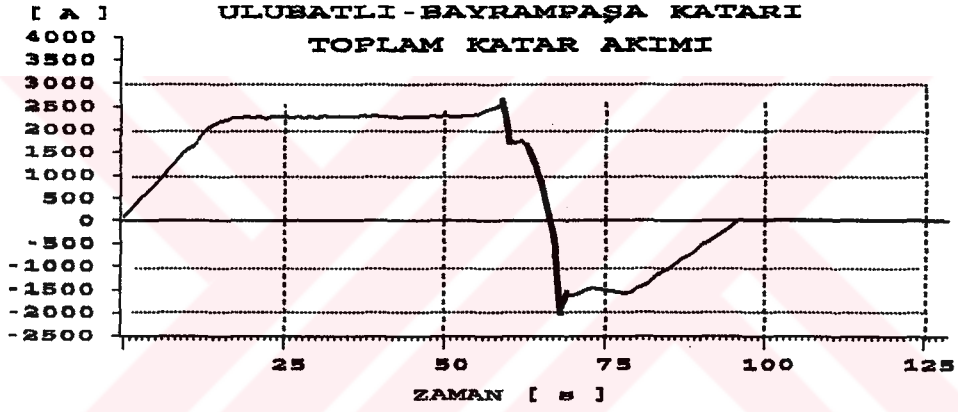
Şekil 7-43



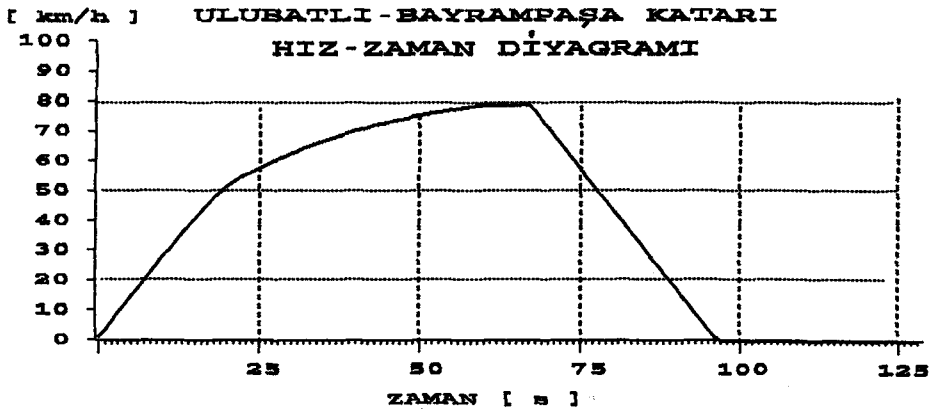
Şekil 7-44



Şekil 7-45



Şekil 7-46



Şekil 7-47

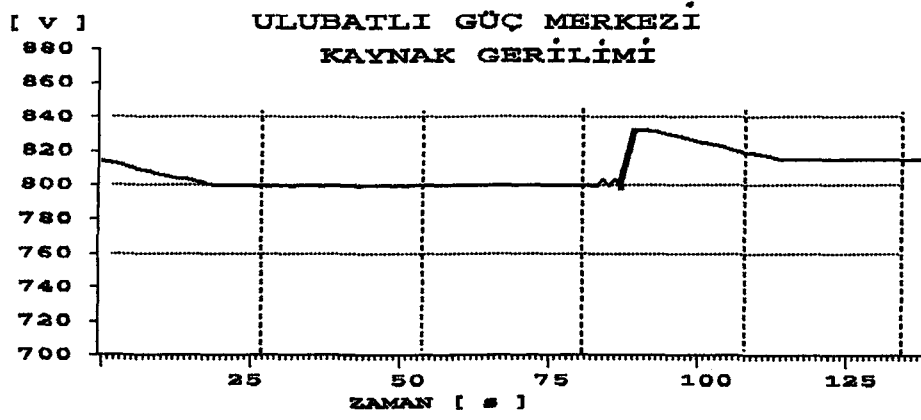
7.2.4. Üç vagonlu bir katarla ait bir vagonun tahrik motorlarının çalışmaması durumu

İstasyon ve güç merkezleri yerleşim planı şekil 7-25' de gösterilen ulaşım sisteminde, Sistemin yalnız bir güç merkezinden beslendiği ve şekil 7-26'de konumları ve hareket yönleri gösterilen katarlardan yalnız Ulubatlı-Bayrampaşa (BSV) katarının çalıştığı ve bu katarın vagonlarından birinin tahrik motorlarının devre dışı kaldığı, diğer katarların aydınlatma ve ısıtma sistemlerinin devrede olduğu varsayılmıştır. Katarlar, güç besleme merkezleri ve kataner sistemine ilişkin diğer bilgiler bölüm 7.2.2.'de verildiği gibidir.

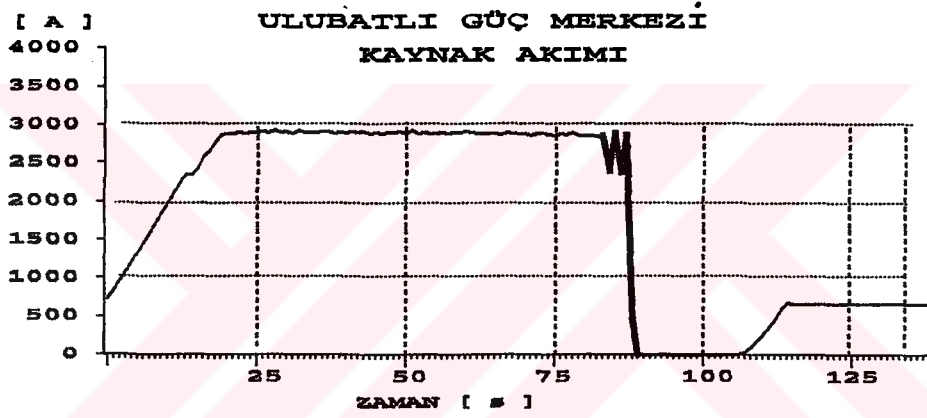
Güç merkezine ilişkin simülasyon sonuçları:
Ulubatlı güç merkezi kaynak gerilimi (şekil 7-48),
kaynak akımı (şekil 7-49), çıkış gücü (şekil 7-50)'de görülmektedir.

Ulubatlı-Bayrampaşa (UBV) katarına ilişkin simülasyon sonuçları:

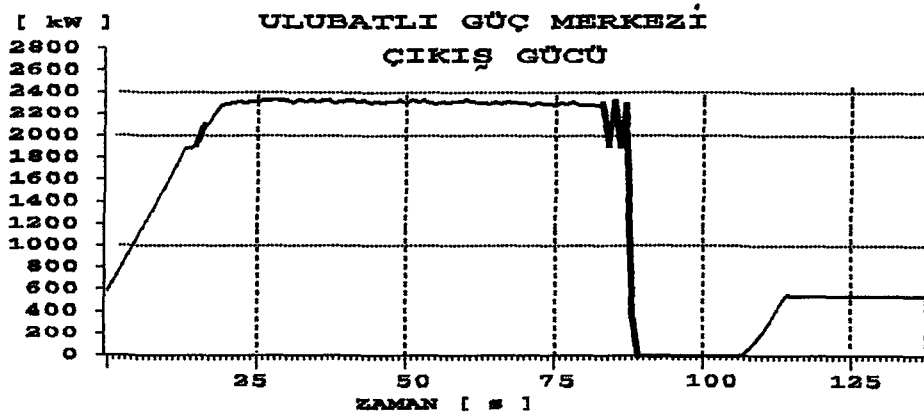
Kataner gerilimi, şekil 7-51, katar akımı şekil 7-52 ve hız-zaman diyagramı şekil 7-53'de görülmektedir.



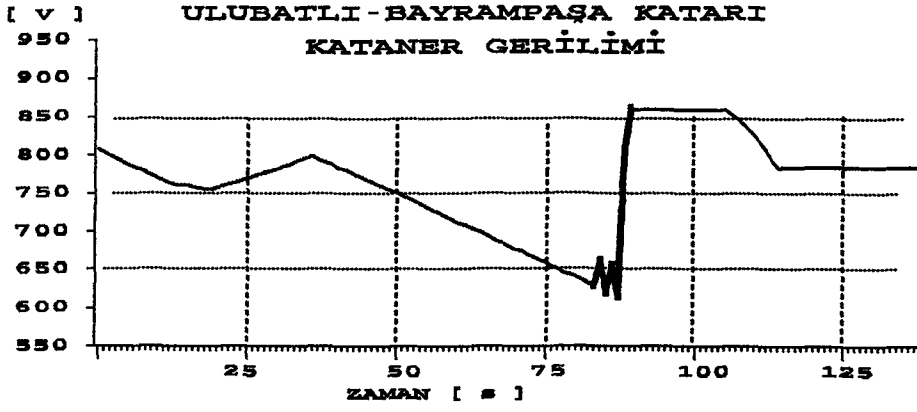
Şekil 7-48



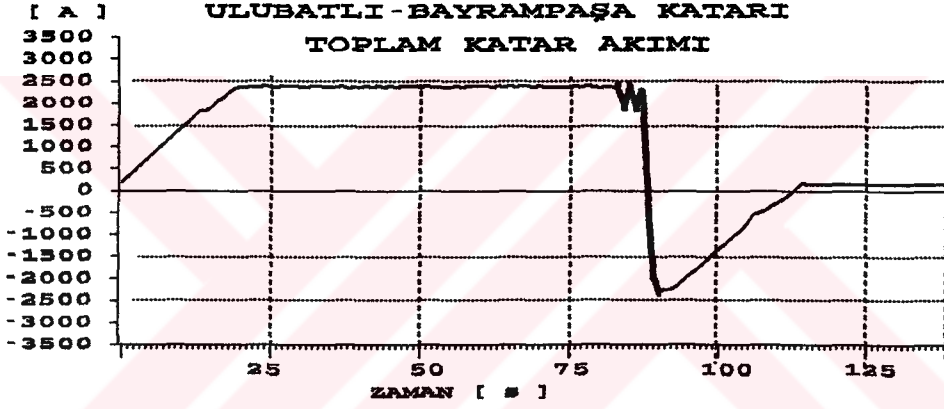
Şekil 7-49



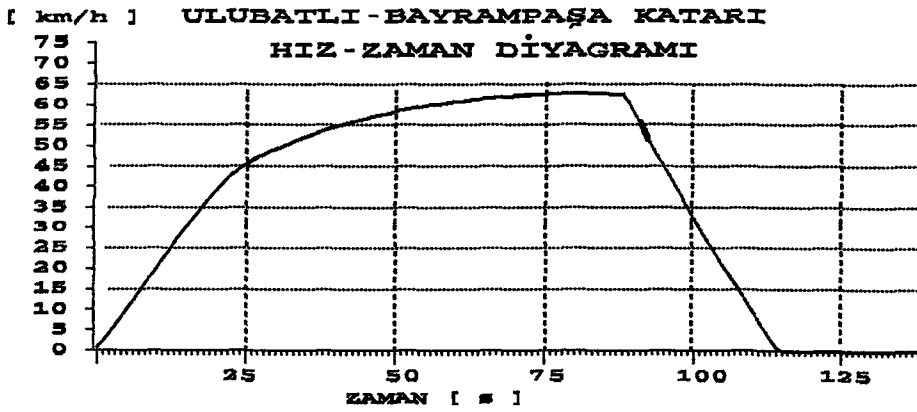
Şekil 7-50



Şekil 7-51



Şekil 7-52



Şekil 7-53

7.2.5. Dört vagonlu bir katarın tek başına hareket etmesi durumu

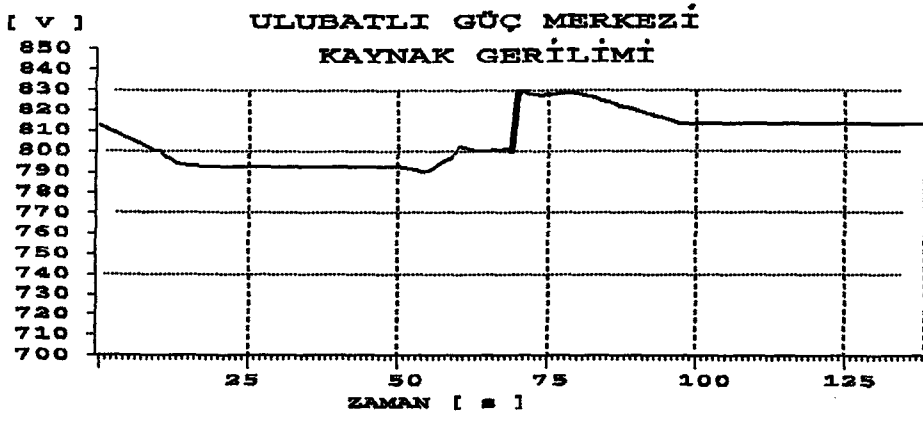
İstasyon ve güç merkezleri yerleşim planı şekil 7-25' de gösterilen ulaşım sisteminde, Sistemin yalnız bir güç merkezinden beslendiği ve şekil 7-26'de konumları ve hareket yönleri gösterilen katarların dört vagonlu olduğu ve bu katarlardan yalnız Ulubatlı-Bayrampaşa (UBV) katarının çalıştığı, diğer katarların aydınlatma ve ısıtma sistemlerinin devrede olduğu varsayılmıştır. Katarlar, güç besleme merkezleri ve kataner sistemine ilişkin diğer bilgiler bölüm 7.2.2.'de verildiği gibidir.

Güç merkezine ilişkin simülasyon sonuçları:

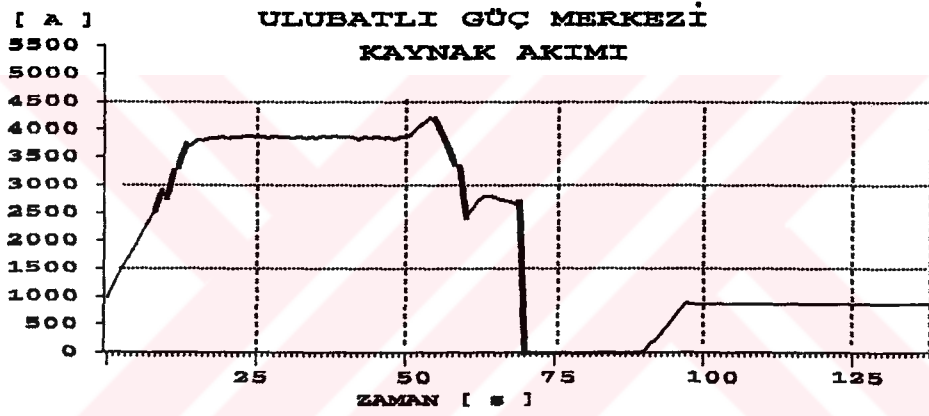
Ulubatlı güç merkezi kaynak gerilimi (şekil 7-54), kaynak akımı (şekil 7-55), çıkış gücü (şekil 7-56)'de görülmektedir.

Ulubatlı-Bayrampaşa (UBV) katarına ilişkin simülasyon sonuçları:

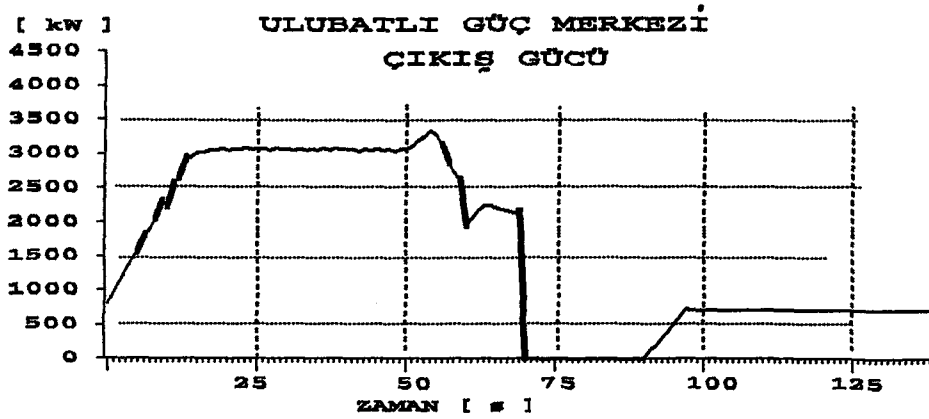
Kataner gerilimi, şekil 7-57, katar akımı şekil 7-58 ve hız-zaman diyagramı şekil 7-59'da görülmektedir.



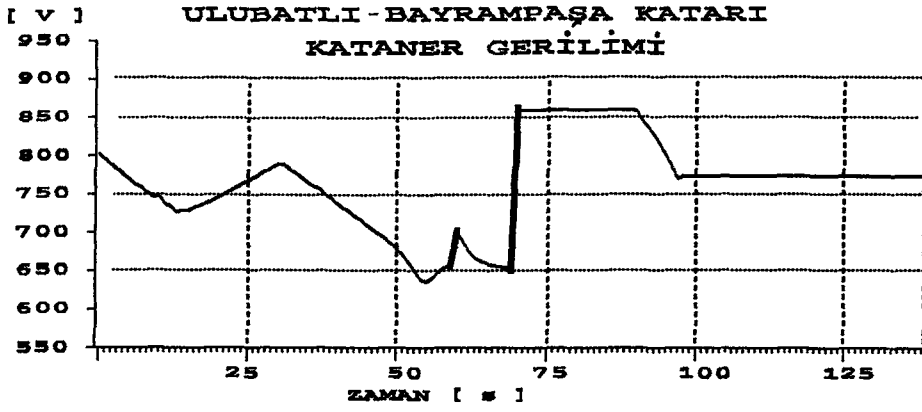
Şekil 7-54



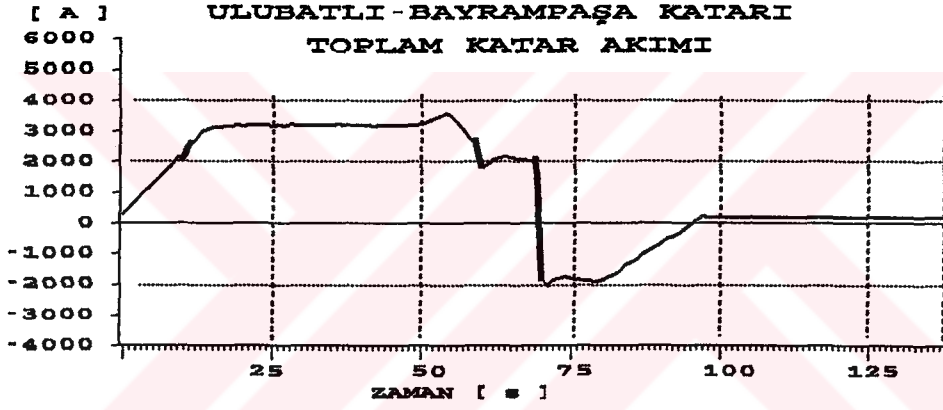
Şekil 7-55



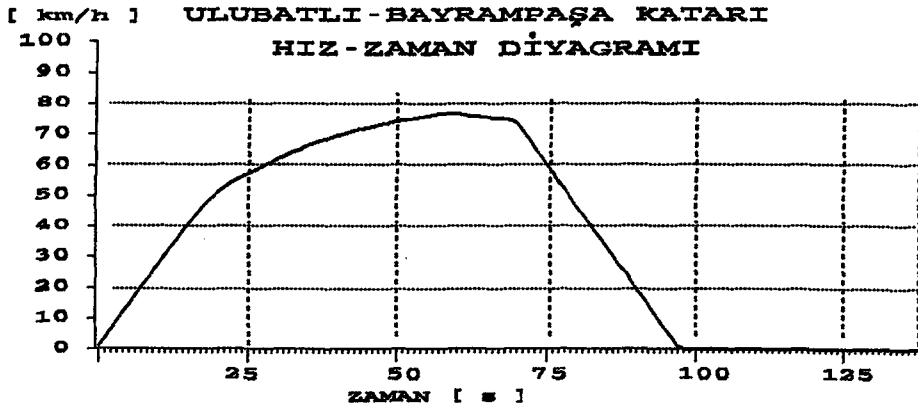
Şekil 7-56



Şekil 7-57



Şekil 7-58



Şekil 7-59

7.2.6. Dört vagonlu bir katarın düşük besleme gerilimi altında tek başına hareket etmesi durumu

İstasyon ve güç merkezleri yerleşim planı şekil 7-25' de gösterilen ulaşım sisteminde, sistemin yalnız bir güç merkezinden beslendiği ve şekil 7-26'de konumları ve hareket yönleri gösterilen katarların dört vagonlu olduğu, bu katarlardan yalnız Ulubatlı-Bayrampaşa (UBV) katarının çalıştığı, diğer katarların aydınlatma ve ısıtma sistemlerinin devrede olduğu ve güç merkezi kaynak çıkış geriliminin 700 V olduğu varsayılmıştır. Katarlar, güç besleme merkezleri ve kataner sistemine ilişkin diğer bilgiler bölüm 7.2.2.'de verildiği gibidir.

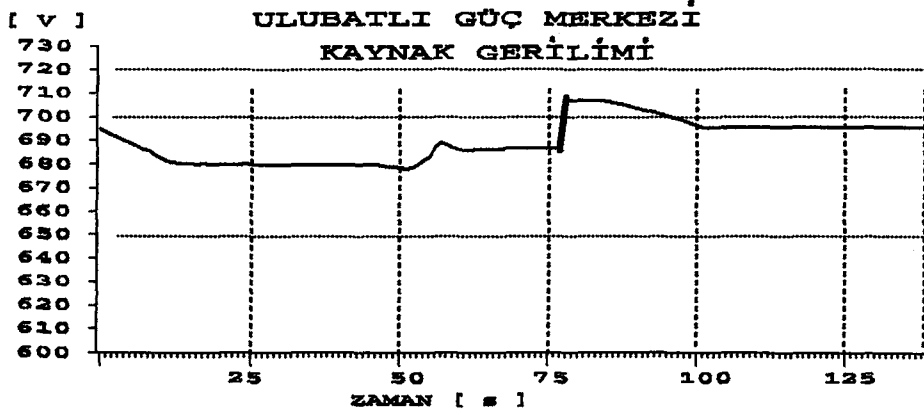
Güç merkezine ilişkin simülasyon sonuçları:

Ulubatlı güç merkezi kaynak gerilimi (şekil 7-60), kaynak akımı (şekil 7-61), çıkış gücü (şekil 7-62)'de görülmektedir.

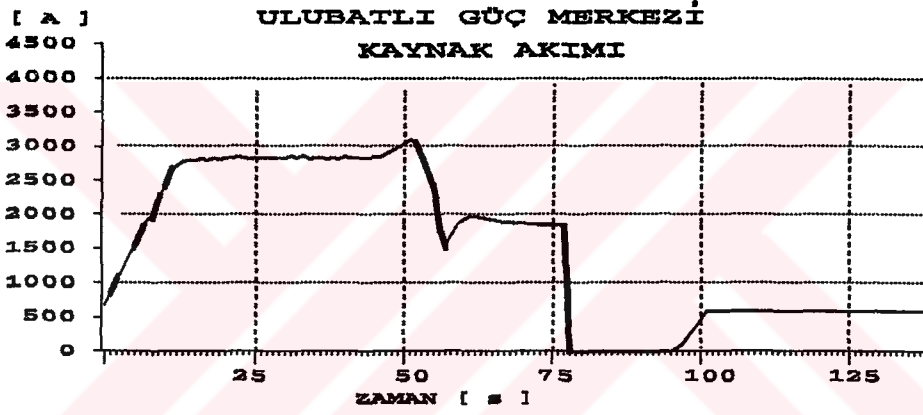
Ulubatlı-Bayrampaşa (UBV) katarına ilişkin simülasyon sonuçları:

Kataner gerilimi, şekil 7-63, katar akımı şekil 7-64 ve hız-zaman diyagramı şekil 7-65'de görülmektedir.

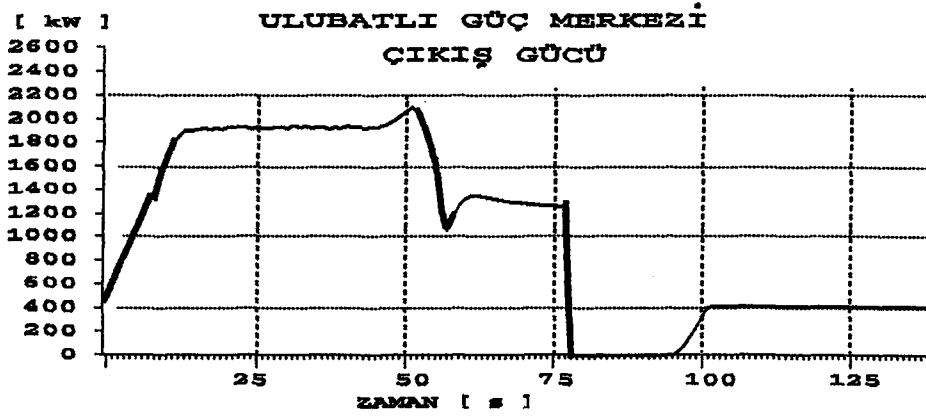
Simülasyon programı, tarafımızdan tanımlanan bu altı çalışma durumu dışında, İstanbul LRT sistemi devreye alınmadan yapılan test sonuçlarıyla da karşılaştırılmış, test ve simülasyon sonuçları EK C'de verilmiştir.



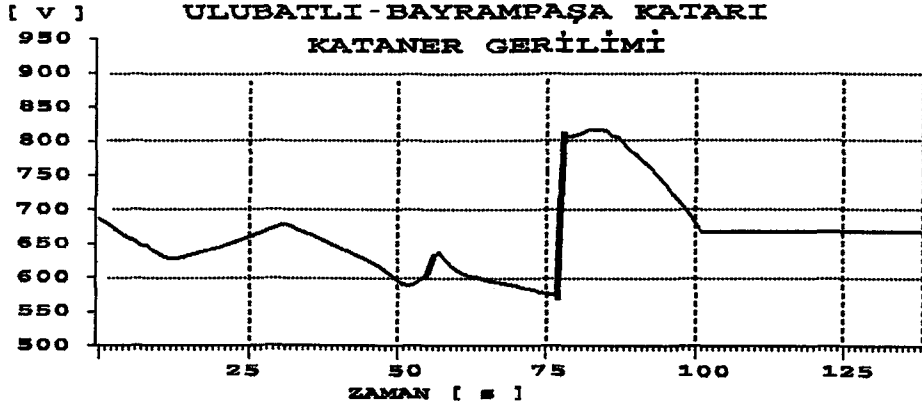
Şekil 7-60



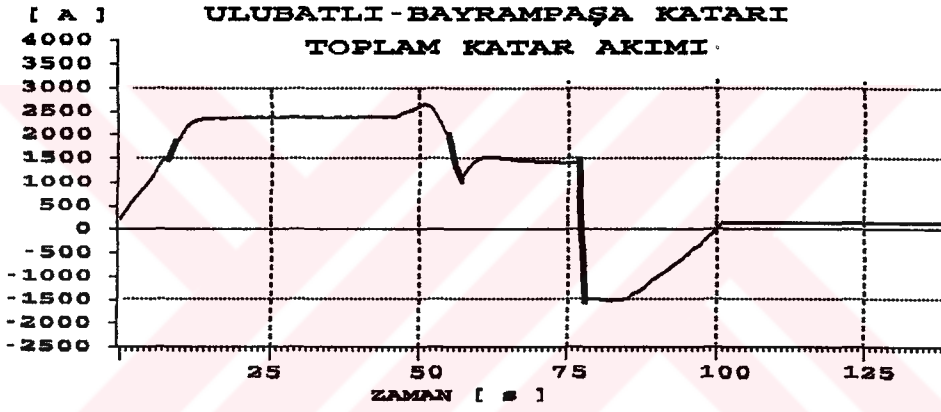
Şekil 7-61



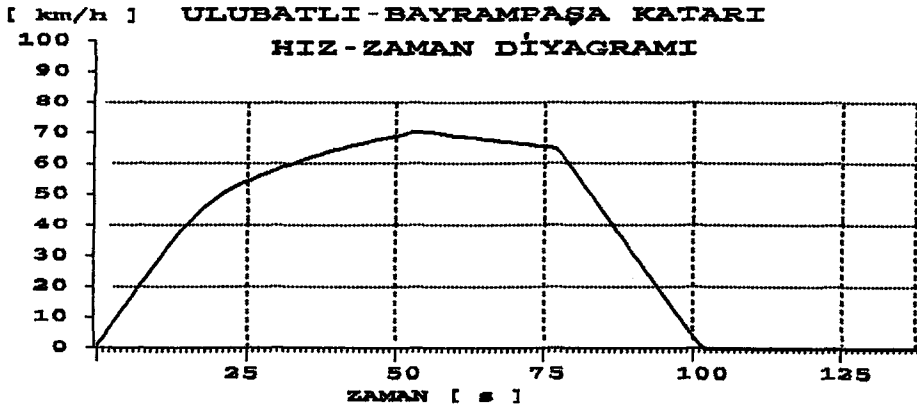
Şekil 7-62



Şekil 7-63



Şekil 7-64



Şekil 7-65

7.3. Simülasyon Sonuçlarının İrdelenmesi

İstanbul LRT sisteminin Sağmalcılar-Ulubatlı arasındaki yol güzergahında, (bölüm 7.2.1-7.2.6)'de tanımlanan çalışma durumlarının simülasyonu ile güç besleme merkezlerine ilişkin aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

1- Üç vagonlu dört katarın aynı anda yol aldığı, güç merkezlerinin paralel çalıştığı durumda, Şekil 7-9'da görüldüğü gibi Sağmalcılar güç merkezi anma değerlerinin altında yüklenmektedir ($P_{1MAX}=2800$ kW). Ulubatlı güç merkezi ise, şekil 7-12'de görüldüğü gibi 20 saniye süreyle anma değerlerinin % 10 üstünde yüklenmiştir ($P_{2MAX}=4400$ kW).

2- Üç vagonlu dört katarın aynı anda yol aldığı ve tek güç merkezinden beslendiği, maksimum yolcu taşındığı durumda, Şekil 7-29'da görüldüğü gibi Ulubatlı güç merkezi 5 saniye süreyle anma değerinin % 25 üstünde, ve 15 saniye süreyle ortalama anma değerinin % 20 üstünde yüklenmiştir. Bu husus LRT sisteminin devreye alınışında da tespit edilmiş ve dört katarın aynı anda yol alması halinde güç merkezinin devre dışı kaldığı kayıtlardan anlaşılmıştır.

3- Üç vagonlu bir katarın tek başına hareket ettiği ve tek güç merkezinden beslendiği, maksimum yolcu taşındığı durumda, Şekil 7-44'de görüldüğü gibi Ulubatlı güç merkezi anma değerinin altında yüklenmiştir ($P_{MAX}=2200$ kW).

4- Diğer çalışma durumlarında güç merkezleri anma değerlerinin altında yüklenmektedir (şekil 7-50, şekil 7-56, şekil 7-62).

Güç merkezlerinin yüklenmesine ilişkin simülasyon sonuçlarından, sistemin, 1 ve 2 de değinilen koşullarda çalıştırılamıyacağı anlaşılr. Konumları şekil 7-6 ve

şekil 7-27' de verilen dört katarın, kalkış zamanlarının uygun şekilde düzenlenmesiyle aynı güç sistemi yeterli olabilir. Bunun için iki katardan biri frenlemeye geçerken diğerinin yol alması en uygun durumdur.

Kontrol stratejisinde, enerji optimizasyonu ve konfor göz önüne bulundurulmamıştır. Bütün yol ve yük koşullarında PI kontrolör parametreleri aynı olduğundan, bazı durumlarda konfor ve enerji optimizasyonu yönünden yeterli sonuca yaklaşılmakta (örneğin Bayrampaşa-Ulubatlı Katarı, şekil 7-18), bazı durumlarda ise örneğin Bayrampaşa-Sağmalcılar katarında olduğu gibi (şekil 7-24) PI kontrolörü yetersiz kalmaktadır. Özellikle üç vagonlu dört katarın aynı anda yol alması ve tek güç merkezinden beslenmesi durumunda enerji optimizasyonu ve konfor yönünden (şekil 7-41) sonuç daha da kötüdür. PID kontrolörleri enerji optimizasyonu ve konfor yönünden, yeterli olmamasına rağmen, ulaşım sistemlerinde kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda, ulaşım sistemlerinde bulanık kontrol "Fuzzy control" algoritmaları kullanılmak üzere çalışmalar yapılmaktadır. Literatürde, henüz bu konuda bir yayın olmamasına karşın bu kontrolörün Japonya'da bir ulaşım sistemine uygulandığı ve Avrupa'da bu konuda çalışıldığı bilinmektedir [50]. Geliştirdiğimiz simülasyon programı bu tür kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve denenmesi için uygundur.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrikli ulaşım sistemleri gibi büyük ve karmaşık fiziksel sistemlerin analiz ve tasarımında bilgisayar kullanımı büyük olanaklar sağlar. Bilgisayar yardımıyla yapılan analiz ve tasarımlarda iyi sonuç alabilmek için, bu sistemleri çok iyi simüle eden simülasyon programlarına sahip olmak gerekir. Büyük ve karmaşık sistemlerin tasarımında daha hızlı ve doğru çözümlere varabilmek için, bu sistemlere özgü fiziksel kısıtlamaları da içeren (güç, gerilim, akım v.s) simülasyon programları geliştirilir ve kullanılır. Bu çalışmada, serbest uyarmalı doğru akım motorları ile tahrik edilen bir ulaşım sisteminde, doğru akım güç merkezlerinin tasarımı, tahrik motorlarının boyutlandırılması, değişik kontrol algoritmalarının tasarlanması ve denenmesi amacıyla bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Bu programda, sisteme ilişkin bütün fiziksel kısıtlamalar göz önünde bulundurulmuş ve deneysel verilerden de yararlanarak sistemi tam olarak simüle eden bir bilgisayar programı elde edilmiştir. Bu program İstanbul LRT sistemine uygulanmış, bulunan sonuçların, yapımcı firmanın verdiği deneysel değerlere ve simülasyon sonuçlarına yakın olduğu görülmüştür.

Simülasyon programında, ulaşım sistemindeki katener, yol profili, seyir direnci, tahrik motorları ve kontrol sistemini oluşturan kısımlar birbirinden bağımsız olarak ele alınmış ve modüler yapıda programlanmıştır. Böylece, sistemde değişiklikler yapılması durumunda, kolay ve hızlı bir şekilde programı uygulayabilme olanağı elde edilmiştir.

Doğru akım motoruna ilişkin matematik modelin elde edilmesinde endüvi reaksiyonu etkisi de göz önüne alınmıştır. Böylece tahrik motorunu oldukça doğru simüle eden

bir program modülü elde edilmiştir. Endüvi reaksiyonu etkisinin göz önüne alınmaması, manyetik akıda % 20'lere varan hatalara neden olabilir. Buna bağlı olarak, rotor akımları vagon hızı, hızlanma ve frenleme zamanları için bulunan değerler hatalı olur. Çalışmamızda, yapımcı firmanın verdiği imalat değerlerinden hareketle, endüvi reaksiyonu etkisi değerlendirilerek, yöntemin daha doğru sonuç vermesi sağlanmıştır.

Simülasyon programında, kullanılan yöntemlerle, serbest veya seri uyarmalı doğru akım motorları ile tahrik edilen ulaşım sistemleri tam olarak simüle edilebilir. Asenkron motor tahrikli ulaşım sistemlerini, aynı doğrulukta bir bilgisayar programı ile simüle edebilmek için, asenkron motorların da aynı özelliklerde ve aynı doğrulukta bir program modülünün geliştirilmesi gerekir.

Simülasyon programı, hiç bir nümerik analiz yöntemi gerektirmeyen, kolay programlanabilir, daha doğru sonuç veren ve bütün örnekleme zamanları için kararlı bir sayısal simülasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, elektrikle tahrik, elektrikli ulaşım literatüründe hiç kullanılmamış olan, z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu ve fark denklemleri kavramlarına dayanır. Sistemin lineer ve lineer olmayan kısımları ayrı ayrı ele alınarak değerlendirilmiş; lineer kısımlar, bu kısımlara ilişkin z-tanım bölgesi transfer fonksiyonundan hareketle, fark denklemleriyle modellenmiştir. Lineer olmayan kısımlar için deneysel bağıntılardan yararlanılmış ve bu kısımlara ilişkin çıkış büyüklükleri, lineer kısımlar için giriş büyüklükleri olarak alınmıştır. Lineer kısımlara ilişkin, fark denklemleri doğrudan programlanabilir. Bunun için hiç bir nümerik analiz yöntemine gerek yoktur. Yöntem, birinci ve ikinci mertebeden sistemlere doğrudan uygulanabilir. Daha yüksek mertebeden sistemlere uygulayabilmek için bu sistemleri birinci ve ikinci mertebeden sistemlere ayırmak gerekir. Yüksek mertebeden polinomları analitik olarak çarpanlara

ayıran matematik paket programları kullanılarak bu işlem hızlı bir şekilde gerçekleşir.

Geliştirilen simülasyon programı, İstanbul LRT sisteminde Ulubatlı-Sağmalcılar arasındaki bölgeye uygulanmış ve çeşitli çalışma durumlarına ilişkin simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar aynı sistem için Birmingham Üniversitesi ulaştırma araştırma grubu tarafından yapılan, doğru akım güç sisteminin incelenmesine ilişkin simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İstanbul LRT sisteminin, Birmingham Üniversitesi ulaştırma araştırma grubu tarafından yapılan bilgisayar programında vagonlar simüle edilmemektedir. Bu programda, sisteme ait işletme verileri kullanılarak, doğru akım güç sistemi, en kötü yüklenme durumu için incelenmiştir. Doğru akım güç sisteminin davranışı, farklı kontrol stratejileri uygulanması durumunda incelenmemiştir.

Geliştirdiğimiz simülasyon programıyla, doğru akım güç sisteminin davranışı, tahrik motorlarına farklı kontrol stratejileri uygulanması halinde de incelenebilir. Çalışmamızda, İstanbul LRT sisteminde, tahrik motorlarının kontrolünde kullanılan PI kontrolör katsayıları belirlendikten sonra, doğru akım güç sisteminin davranışı, bu parametrelere göre incelenmiştir. Simülasyon programı, bu özelliği ile, enerji optimizasyonuna ilişkin kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve denenmesinde kullanılabilir. Ayrıca sistem davranışı ile ilgili bilgilerden yararlanarak geliştirilebilecek bulanık kontrol (fuzzy control) türünde değişik kontrol algoritmalarının kolaylıkla uygulanabilmesine olanak sağlar. Bulanık kontrol algoritmalarının, Japonya'da bir ulaşım sistemine uygulandığı ve Avrupa'da bu konuda çalışmalar yapıldığı bilinmektedir [50]. Sistemleri tam olarak simüle eden bilgisayar programları olmadan kontrol algoritmalarını geliştirmek ve denemek olanaksızdır. Geliştirdiğimiz simülasyon programı, bu tür kontrol algoritmalarının geliştirilmesine uygun yapıdadır.

Elektrikle ulaşım sistemlerinde, enerji optimizasyonu için gerekli koşullar matematiksel olarak elde edilmiş ve bulunan optimal çözümlerin geçeklenebilirliği tartışılmıştır. Bir taşıtın belirli bir yolu belirli bir zamanda minimum enerjiyle katetmesi için, patinaj, konfor ve güç sisteminin sınırladığı maksimum yol alma ivmesiyle hızlanması ve maksimum frenleme ivmesi ile yavaşlaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Enerji optimizasyonuna ilişkin kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve denenmesinde, konfor, patinaj ve güç sistemi sınırlarının göz önünde bulundurulması gerekir. Simülasyon programında bu etkenler de göz önünde bulundurularak, programın enerji optimizasyonuna ilişkin kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve denenmesinde kullanılabilmesi amaçlanmıştır.

Doğru akım serbest uyarmalı motor tahrikli ulaşım sistemleri için geliştirilen bu simülasyon programı, İstanbul LRT sistemine başarıyla uygulanmıştır. Mevcut sistemde, bu program yardımıyla, enerji optimizasyonu ve konfor yönünden kontrol algoritmaları geliştirilir ve sonuçları görülebilir. Bu sistem için her türlü işletme koşulları, örneğin: tarifenin değiştirilmesi, katarlardaki vagon sayılarının arttırılması, bir vagonun tahrik motorlarının çalışmaması gibi durumlarda, doğru akım güç sistemi, tahrik motorları ve diğer katarlar üzerindeki etkileri incelenebilir. Çalışmamızın son bölümünde bu gibi durumlar tanımlanarak, simüle edilmiş ve sonuçları irdelenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] THOMPSON,P.M., Computer-Aided Control System Design, System Technology inc.,1988
- [2] MOLER,C., LITTLE,C., BANGERT,S., KLEIMAN,S., Pro-Matlab, The Math Works, 1986.
- [3] ELMQVIST,H., ASTRÖM,K.J., SCHÖNTHAL,T., Simnon, Ppocenttalen, Lund, 1988.
- [4] SCHÖNTAL,T., A Simulation Language for Nonlinear Systems, Digital Control Applications with TMS 320 Family, Texas Instruments, pp. 103-107,1991.
- [5] DERVİŞOĞLU, A., Mühendislikte Bilgisayarla Analiz Yöntemleri, İ.T.Ü E.E.F., Ders Notu,1982.
- [6] CHUA,B.O., LIN,P.M., Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits, Prentice-Hall, 1975.
- [7] AKTAŞ,Z., Sayısal çözümleme,ODTÜ,1981.
- [8] CHAPRA,C.C., Canale,R.P., Numerical Methods for Engineers, McGraw Hill,1985.
- [9] MELLITT,B., GOODMAN, C.J., ARTHURTON,R.I.M., Simulator for Studying Operational and Power-Supply Conditions in Rapid-Transit Railways, IEE, Proc.Vol.125,No.4, April 1978.
- [10] GOODMAN,C.J., MELLITT,B. RAMBUKWELLA,N.B., CAE For Electrical Design of Urban Rail Transit Systems, Computer in Railway Operations, pp 174-193, Springer-Verlag, 1987.

- [11] CORNEL,C.J.H.,JOHN,V.I., An Enhanced Version of the Electric Network Simulator Program,IEEE Trans. On Vehicular Tech. Vol.40, No.1, 1991.

- [12] GOODMAN,C.J.,TASKIN,T., DC Power System Study for ASEA LRT Istanbul Project, Report, Ailrt-1 Vol.I, 1987.

- [13] PICCOLO, A., ROTONDALE,N., Computer Harmonic Representation of Traction Choppers,Computer in Railway Operations, pp 74-83,Springer Verlag, 1987.

- [14] BATTISTELLI,L., LOSI,A., PICCOLO,A., ROTONDALE,N., Harmonic Evaluations in DC Traction Substations, Computer in Railway Operations,pp 86-101, Springer Verlag, 1987.

- [15] DEBEDE,K., RAJAGOPALAN,V., Modeling and Simulation of Point on Line Switching of VSI-Fed Induction Motor, IEEE Trans. on Vehicular Tech., Vol.27, No.4,1991.

- [16] HUI,S.Y.R., CHRISTOPOULOS,C., Computer Simulation of a Converter-Fed DC Drive Using the Transmission-Line Modeling Technique, IEEE Trans. on PE.,Vol.6, No.4., 1991.

- [17] BURDETT,S., ALLAN,J., TAUFIG,A., Simulation Techniques for Studying AC Railway Power Electronic Traction Drive Circuits, Elektrische Bahnen, H.3, S.155, 1990.

- [18] PRATT,J.P., GRUBER,S., A Real-Time Digital Simulation of Synchronous Machines.,IEEE Trans.IA,Vol.IE-34, nO.4, 1987.

- [19] RECKHORN,T., ACKVA,A., Comparison of Current-fed and Voltage-Source Traction Drive with Separately Excited Synchronous Machine,Elektrische Bahnen, H.3, S.161, 1990.

- [20] BOSE, K.B., SZCZENSY, P.M., A Microcomputer-Based Control and Simulation an Advanced IPM Synchronus Machine Drive system for Electric Vehicle Propulsion, IEEE Trans. IA, Vol. IE-35, No. 4, 1988.
- [21] WALCZYNA, A.M., PHILLPOTTS, R.E., Simulation model of AC/DC Traction Converters and Drives for The Calculation of Input Power Characteristics, International Conference on Main Line Railway Electrification, pp. 373-377, IEE, 1989.
- [22] UHER, R.A., Rail Traction Energy Management Model, Computer in Railway Operations, pp 40-41, Springer-Verlag, 1987.
- [23] BIELLA, W., Die rechnergesteuerte adaptive ahrkennlinienvorgabe zur Energieoptimierung bei Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen, TUB Dissertation, Berlin, 1988.
- [24] SUJITJORN, S., MELLITT, B., RAMBUKWELLA, N.B., Energy Minimisation in Transit Systems Using a Train Based Expert Systems for Dynamic Coast Control, Computer in Railway Operations, pp 305-315, Springer-Verlag, 1987.
- [25] OLESEN, P., ANDERSEN, U.S., Electrification of DSP Main Lines CAD-Application for Design of Overhead Catenary System, Computer in Railway Operations, pp 123-143, Springer-Verlag, 1987.
- [26] GILL, D.C., GOODMAN, C.J., Automated Search Technique for Optimising Speed Command Levels in the London Underground Central Line Atc System, Computer in Railway Operations, pp 287-310, Springer-Verlag, 1987.

- [27] ENGLISH,G.W., MICHAUD,J.C., A Simulation-Based Assessment of Locomotive Adhesion Performance in Curve Negotiation, Computer in Railway Operations, pp.197-213, Springer-Verlag,1987.
- [28] KUO, B.C., Digital Control Systems, Holt, Rinehart and Winston, 1980.
- [29] HOSTETTER,G.H., Digital Control System Design, Holt, Rinehart and Winston, 1988.
- [30] ASTRÖM,K.J., WITTENMARK,B., Computer Controlled Systems, Prentice-Hall, 1984.
- [31] JURY,E.I., Theory and Application of The z-transform Method, John Wiley&sons, (1964),
- [32] BRONSTEIN,I.N., SEMENDJAJEW,K.A., Taschenbuch der Mathematik, Harri Deutsch, Frankfurt,1962.
- [33] WOLFRAM, S., Mathematica, Addison-Wesley, 1991.
- [34] SACHS, K., Elektrische Triebfahrzeuge, Springer-Verlag, 1973.
- [35] FOULDS,L.R., Optimization Techniques an Introduction, Springer-Verlag, 1981.
- [36] LUENBERGER,D.W., Introduction to Linear and Nonlinear Programming, Addison-Wesley Publishing Company, 1973.
- [37] GARG, V.K., DUKKIPATI,R.V., Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press, Canada,1984.
- [38] LEHMANN,H., Bahnsysteme und ihr Wirtschaftlicher Betrieb,Tetzlaff Verlag, Darmstadt, 1978.
- [39] ÜLGÜR, M.M., Doğru Akımla Cerde Elektrik Donanımı, (çeviri) Teknik Ü. Matbaası,İstanbul, 1964.

- [40] URAL,A., Modern Elektrikli Ulaşım Sistemleri, Yıldız Ü. Kocaeli Müh.Fak. (1991).
- [41] URAL,A., Çer Tekniğinde en Mühim Büyüklük Olan $A[kWh/km.sene]$ 'nin Analitik ifadesinin Bulunması ve Bu ifadenin Değişkenlerine bağlılığının Etüdü, İ.T.Ü. EEF., Doktora Tezi, 1970.
- [42] SCHAEFER,H.H., Vergleich der Zugwiderstandsformeln Europäischer und AusBereuropäischer Eisenbahnen, Elektrische Bahnen,H.2, S.55, 1988.
- [43] SARIOĞLU, M.K., Doğru Akım Makinalarının Geçici Rejimleri, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, 1975
- [44] KUO,B.C., TAL,J., Incremental Motion Control I, SRL Publishing Company, (1978).
- [45] LANDER, C.W., Power Electronics, McGraw-Hill,1981.
- [46] CARNAHAN,B., LUTHER,H.A., WILKES,O.J.,Applied Numerical Methods, JOHN WILEY & SONS,1969.
- [47] ASEA TRACTION., Design and Installation Documents, 1986.
- [48] EUREKA: The Solver, Owner's Handbook, Borland Internatioonal, Inc., First Edition, Ver. 1.0, 1986.
- [49] DESOER,C.A., KUH,E.S., Basic Circuit Theory, McGraw Hill, 1966.
- [50] REINFRANK, M., Fuzzy Control Systems:Clear Advantages, Siemens Review, 6/91 Volume 58,1991.

EK A

MIKNATISLANMA EĞRİSİNDEN ALINAN
DEĞERLERLE AKI FONKSİYONUNDAN HESAPLANAN
DEĞERLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ie [A]	Ia[A]	AKI _{HEĐ} [cwb]	AKI _{FED} [cwb]	HATA[%]
7	50	1.15	1.16	-0.97
10	50	1.6	1.48	7.26
15	50	1.92	1.87	2.73
18	50	2.01	2.03	-1.01
20	50	2.11	2.12	-0.37
22	50	2.2	2.19	0.39
7	100	1.14	1.15	-0.44
10	100	1.58	1.47	7.09
15	100	1.9	1.86	2.11
18	100	1.99	2.01	-1.01
20	100	2.1	2.10	-0.05
22	100	2.18	2.18	0.18
7	200	1.11	1.10	1.08
10	200	1.5	1.42	5.27
15	200	1.84	1.81	1.90
18	200	1.95	1.97	-0.77
20	200	2	2.05	-2.50
22	200	2.11	2.13	-0.85

AKI_{HEĐ}[cwb]: Miknatıslanma eğrisinden okunan akı değerleri
AKI_{FED}[cwb]: Akı fonksiyonundan hesaplanan akı değerleri
HATA[%]: $(AKI_{HEĐ} - AKI_{FED}) / AKI_{HEĐ} \times 100$

Ie[A]	Ia[A]	AKI _{HED} [cWb]	AKI _{FED} [cWb]	HATA[%]
7	280	1.08	1.05	2.77
10	280	1.43	1.37	3.99
15	280	1.71	1.76	-2.69
18	280	1.89	1.92	-1.53
20	280	1.96	2.01	-2.35
22	280	2.03	2.08	-2.46
7	400	1	0.96	3.70
10	400	1.3	1.29	1.08
15	400	1.57	1.67	-6.31
18	400	1.77	1.83	-3.50
20	400	1.86	1.92	-3.17
22	400	1.94	1.99	-2.58
7	500	0.9	0.88	2.67
10	500	1.2	1.20	-0.08
15	500	1.44	1.59	-10.07
18	500	1.65	1.75	-5.88
20	500	1.75	1.83	-4.57
22	500	1.84	1.91	-3.70

AKI_{HED}[cWb]: Mıknatıslanma eğrisinden okunan akı değerleri

AKI_{FED}[cWb]: Akı fonksiyonundan hesaplanan akı değerleri

HATA[%]: $(AKI_{HED} - AKI_{FED}) / AKI_{HED} \times 100$

EK B

UYARMA AKIMINA BAĞLI OLARAK $\delta = -1.534537$ SABİT DEĞERİNDE
HESAPLANAN Γ DEĞERLERİ

$I_f [A]$	Γ	Γ/Γ_{22}
7	0.000018	0.853545
10	0.000026	1.223823
15	0.000024	1.146351
17	0.000023	1.102933
20	0.0000213	0.99828
22	0.000021	1

Γ_{22} : $I_f=22$ A için alınan değerlerden hesaplanan katsayı

EK C

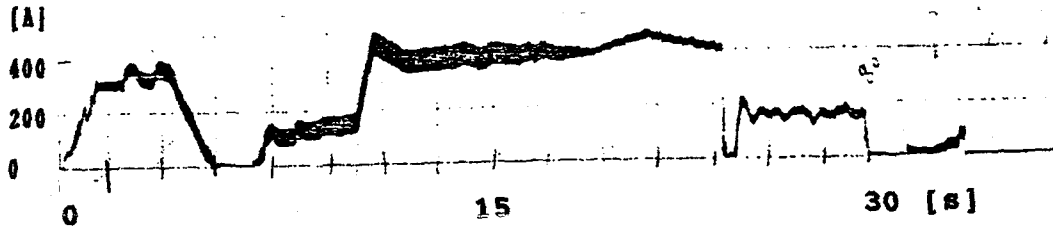
İSTANBUL LRT SİSTEMİNDE YAPILAN TESTLER İLE SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

İstanbul LRT sistemi devreye alınırken yapılan sistem testlerine ilişkin iki ayrı sonuç simülasyon programından alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu testlerin yapılması sırasındaki yol ve yük koşulları, tahrik motorlarına ait kontrolör parametreleri simülasyon programında değerlendirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Testlere ilişkin koşullar şunlardır:

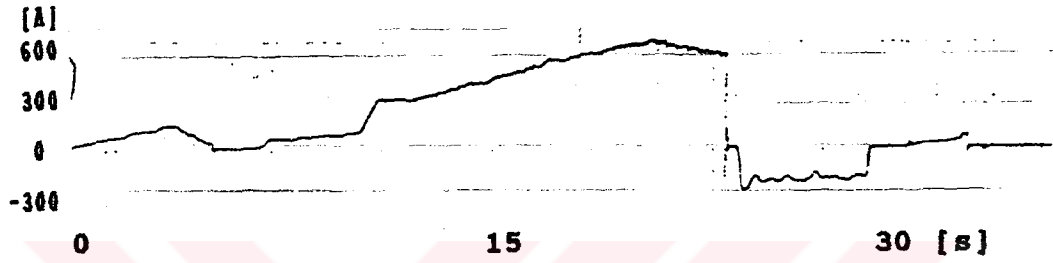
TEST 1: Ağustos 1989'da Otogar-Kartaltepe istasyonları arasında, aşırı yükte (toplam vagon kütlesi 58370 kg) gerçekleştirilen test ölçüm sonuçları şekil c-1,..şekil c-4; aynı koşullar simüle edilerek gerçekleştirilen sonuçlar şekil c-5,.. , c-8 'de verilmiştir.

TEST 2: Mayıs 1989'da Sağmalcılar-Bayrampaşa istasyonları arasında, tam yükte (toplam vagon kütlesi 41200 kg) gerçekleştirilen test ölçüm sonuçları şekil c-9,..şekil c-12; aynı koşullar simüle edilerek gerçekleştirilen sonuçlar şekil c-13,.. , c-16 'da verilmiştir.

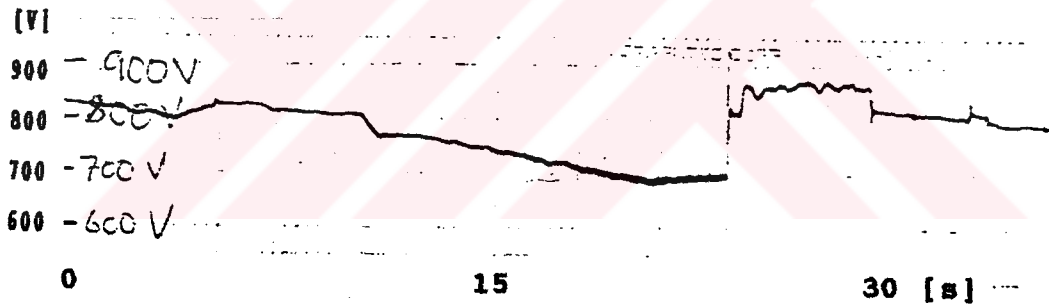
TEST 1 ÖLÇÜM SONUÇLARI



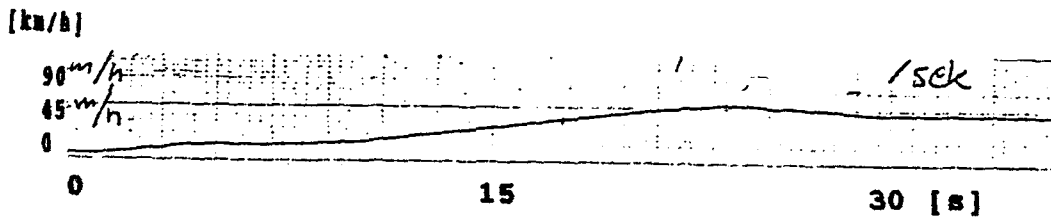
Şekil c-1: Tahrik motoru endüvi akımı



Şekil c-2: Bir vagonun çektiği hat akımı



Şekil c-3: Hat (katener) gerilimi

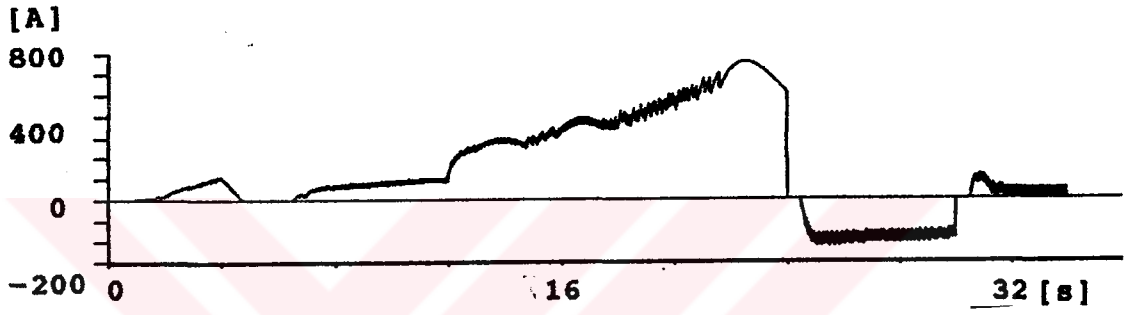


Şekil c-4: Hız-zaman diyagramı

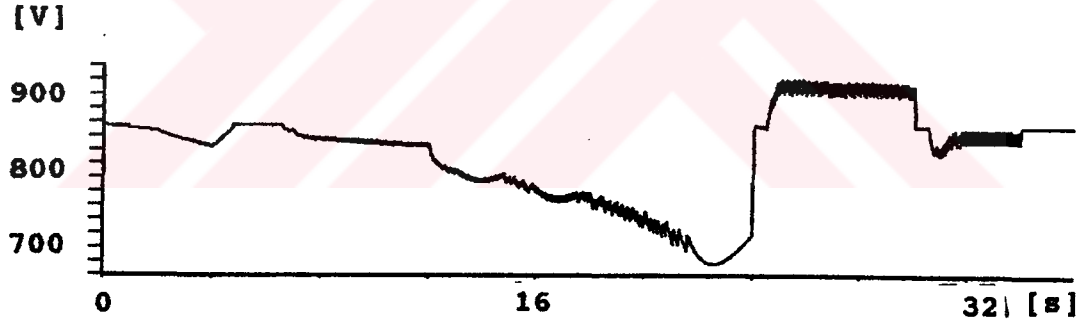
TEST 1 SİMÜLASYON SONUÇLARI



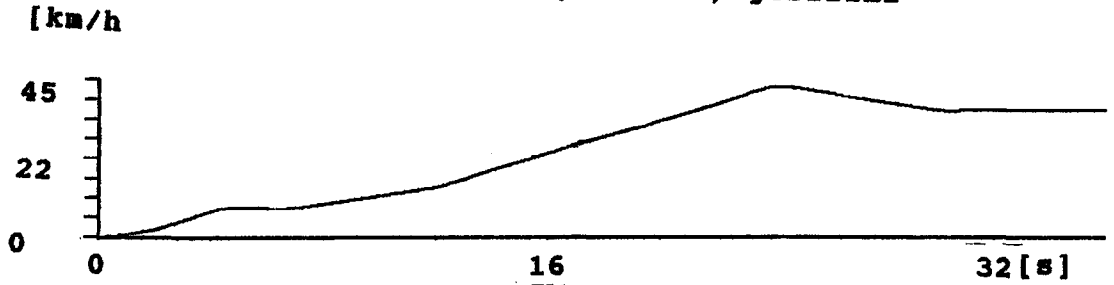
Şekil c-5: Tahrik motoru endüvi akımı



Şekil c-6: Bir vagonun çektiği hat akımı

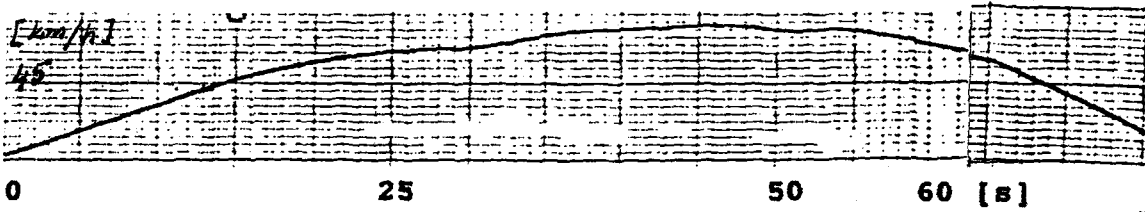
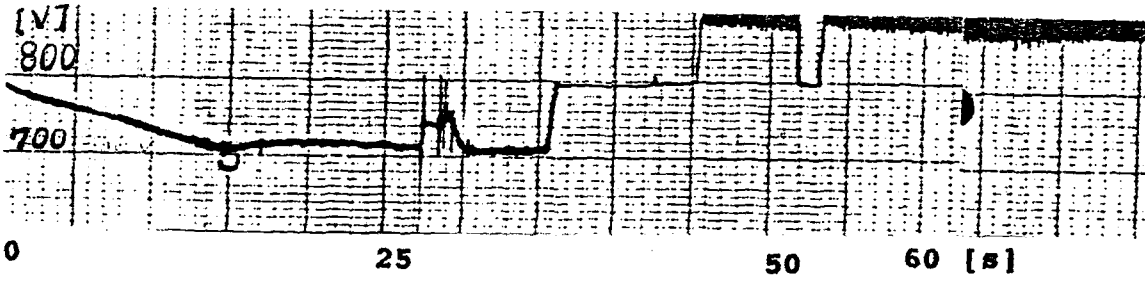
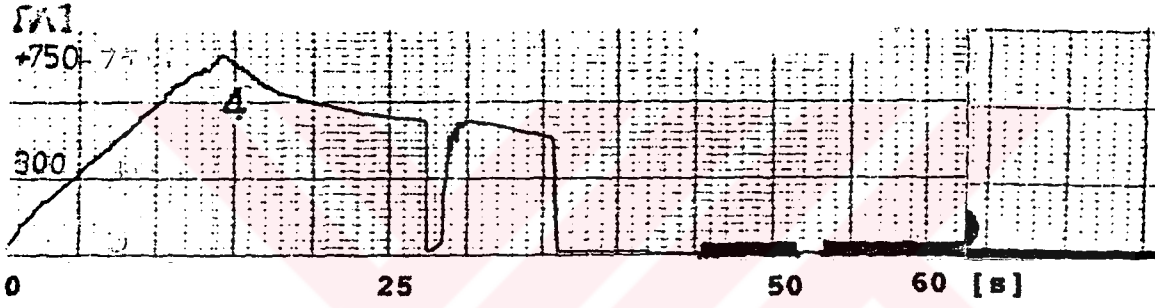
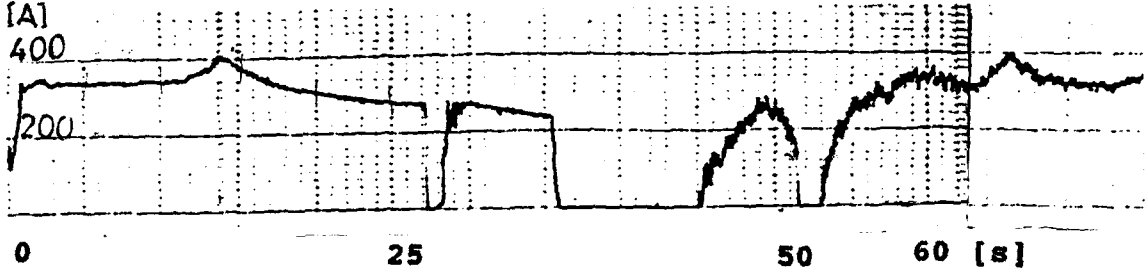


Şekil c-7: Hat (katener) gerilimi

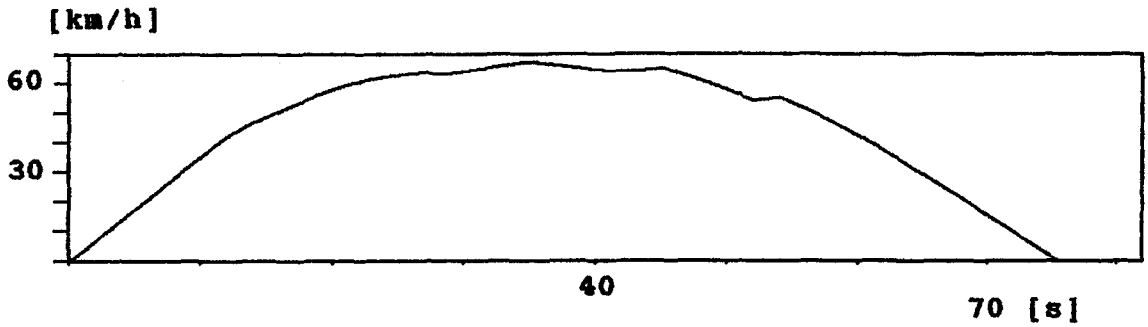
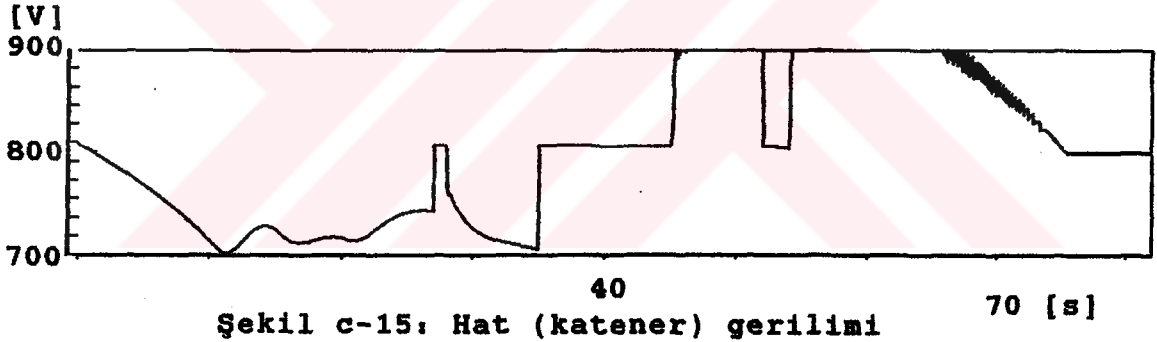
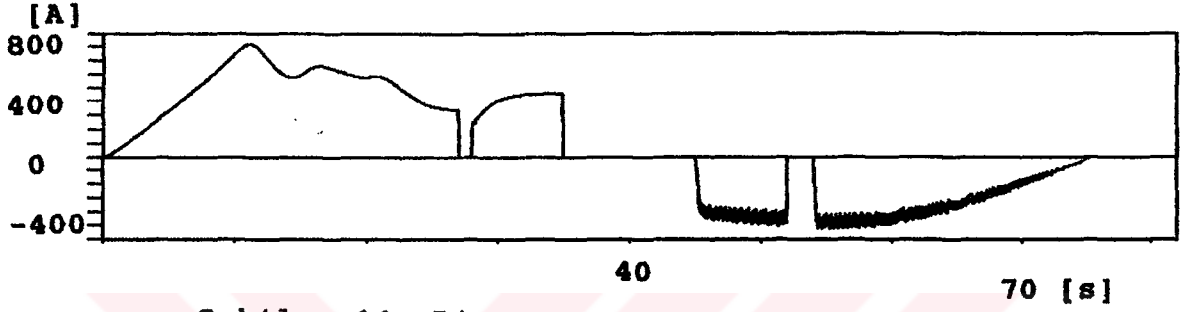
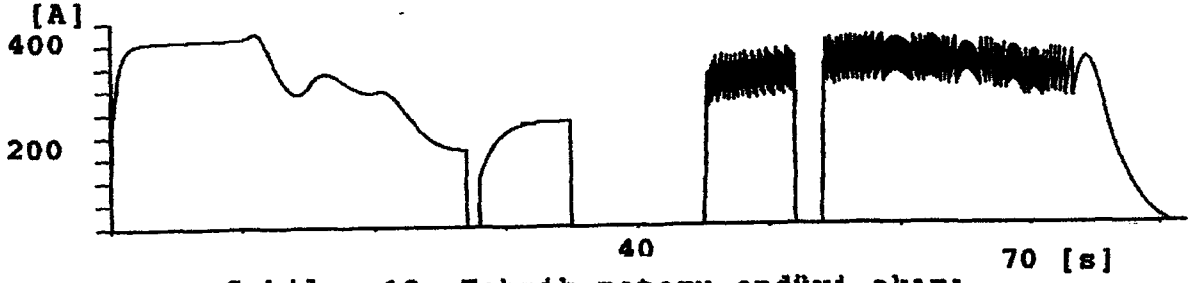


Şekil c-8: Hız-zaman diyagramı

TEST 2 ÖLÇÜM SONUÇLARI



TEST 2 SİMULASYON SONUÇLARI



ÖZGEÇMİŞ

Salman Kurtulan 1957 yılında Pazarcık'ta doğdu. Orta öğretimini 1975'de Pazarcık Lisesinde, lisans öğrenimini 1982 yılında İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi Enerji Bölümü'nde, Yüksek lisans öğrenimini 1985 yılında İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Ana Bilim Dalı'nda tamamladı. 1982 yılında İ.T.Ü Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Bilgisayar Bölümü'nde teknisyen mühendis olarak göreve başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.