T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# GÜÇ SİSTEMLERİNİN DURUM UZAY TEKNİKLERİ İLE ANALİZİ

RAMAZAN AKKILINÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

MALATYA
Şubat 2011

Tezin Başlığı: GÜÇ SİSTEMLERİNİN DURUM UZAY TEKNİKLERİ İLE ANALİZİ

Tezi Hazırlayan: Ramazan AKKILINÇ

Sınav Tarihi: 28.01.2011

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Sınav Jürisi Üyeleri**

Doç. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI .....

Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ .....

Yrd. Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ .....

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Asım KÜNKÜL
Enstitü Müdürü

**ONUR SÖZÜ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “GÜÇ SİSTEMLERİNİN DURUM UZAY TEKNİKLERİ İLE ANALİZİ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ramazan AKKILINÇ

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜÇ SİSTEMLERİNİN DURUM UZAY TEKNİKLERİ İLE ANALİZİ

Ramazan Akkılınç

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

109 + x sayfa

2011
Danışman: Prof. Dr. M. Salih Mamiş

Güç sistemlerinde, yıldırım gibi dış atmosferik deşarjlardan kaynaklanan aşırı gerilimlerin yanında açma-kapama olayları, kısa devre arızaları, generator yükünün kalkması, boşta çalışan hatlardaki Ferranti olayı gibi iç nedenlerden kaynaklanan aşırı gerilim ve akımlara da sıkça rastlanmaktadır. Meydana gelen bu aşırı akım ve gerilimlerin mümkün olan en yüksek doğrulukta tespiti, koruma elemanlarının tasarımı ve izolasyon koordinasyonu açısından büyük önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada, iletim hatlarına enerji verilmesi sırasında meydana gelen geçici aşırı akım ve gerilimler durum uzay teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Sistemin durum uzay denklemleri elde edilmiş, bu denklemler hem analitik olarak hem de nümerik integral yöntemleri (Euler, Runge Kutta ve Trapez) kullanılarak çözülmüştür. Çalışılan örneklerin sistem kararlılığı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar EMTP-ATP programı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Durum uzay tekniklerinin güç sistemlerinin geçici rejim analizi için elverişli olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Güç sistemleri, Durum uzay teknikleri, Geçici rejim analizi, Euler yöntemi, Runge Kutta yöntemi, Trapez yöntemi, Analitik çözüm yöntemi, Kararlılık, EMTP-ATP

## ABSTRACT

MA Thesis

POWER SYSTEM ANALYSIS USING STATE SPACE TECHNIQUES

Ramazan Akkılınç

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

109 + x pages

2011
Supervisor: Prof. Dr. M. Salih Mamiş

In power systems, in addition the voltages as a result of the external effects, such as lightning surges initiated as a result of atmospheric discharges, overvoltages and overcurrents are resulted due to switching events, short-circuit faults, loss of load and Ferranti effects in unloaded transmission lines. Accurate determination of transient voltages and currents is important for the design of protection equipment and isolation coordination. In this study, transient current and voltages after line energization are computed using state-space techniques. State equations describing the system are formulated and these equations are solved analytically and also using different numerical integration methods such as Euler method, Runge Kutta method and Trapezoidal rule of integration. Stability of the systems studied is investigated. The results obtained using state-space techniques are compared with those obtained using EMTP-ATP. The state-space techniques are found suitable for transient analyses in power systems.



KEY WORDS: Power systems, State-space equations, Transient analysis, Euler method, Runge Kutta method, Trapezoidal rule of integration, Analytical solution, Stability of system, EMTP-ATP

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, tavsiye ve desteğini aldığım beni yönlendiren; bilgi ve birikimlerini bana aktaran ve değerli zamanını ayıran danışman hocam Sayın Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ'e;

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaşan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığında görev yapan tüm öğretim üyelerine;

Ayrıca tüm hayatım boyunca ilgi ve desteklerini benden esirgemeyen değerli aileme, tüm sevdiklerime;

Teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER


| | | Sayfa |
|---|---|---|
| ÖZET | | i |
| ABSTRACT | | ii |
| TEŞEKKÜR | | iii |
| İÇİNDEKİLER | | iv |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | | vi |
| ÇİZELGELER LİSTESİ | | ix |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | | x |
| 1. | GİRİŞ | 1 |
| 2. | KAYNAK ÖZETLERİ | 3 |
| 3. | MATERYAL VE YÖNTEM | 6 |
| 3.1. | Güç Sistemleri | 6 |
| 3.1.1. | Güç sistemleri analizi | 6 |
| 3.1.2. | Güç sistemlerinin modellenmesi | 6 |
| 3.2. | Enerji İletim Hatları | 7 |
| 3.2.1. | Kısa uzunluktaki hatlar | 8 |
| 3.2.2. | Orta uzunluktaki iletim hatları | 9 |
| 3.2.3. | Uzun iletim hatları | 10 |
| 3.2.4 | İletim özellikleri | 10 |
| 3.2.4.1. | Zayıflama | 10 |
| 3.2.4.2. | Yayılma hızı | 11 |
| 3.2.4.3. | Karakteristik empedans | 12 |
| 3.2.5. | Yürüyen dalganın yansıması ve kırılması | 12 |
| 3.2.5.1. | Hat sonu omik yük durumu | 13 |
| 3.2.5.2. | Hat sonu endüktif yük durumu | 15 |
| 3.2.5.3. | Hat sonu kapasitif yük durumu | 16 |
| 3.2.6. | Yürüyen dalganın zayıflaması | 18 |
| 3.3. | Durum Uzay Denklemleri | 19 |
| 3.3.1. | Niçin durum uzay denklemleri kullanılır | 19 |
| 3.3.2. | Durum | 20 |
| 3.3.3. | Durum değişkenleri | 20 |
| 3.3.4. | Durum vektörü | 20 |
| 3.3.5. | Durum uzayı | 21 |
| 3.3.6. | Durum uzayı denklemleri | 21 |
| 3.3.7. | Graf teorisi | 21 |
| 3.3.7.1. | Durum denklemlerinin elde edilmesi | 22 |
| 3.4. | Durum Denklemlerinin Çözümünde Kullanılan Nümerik İntegral ve Analitik Çözüm Yöntemleri | 22 |
| 3.4.1 | Euler yöntemi | 23 |
| 3.4.2. | Runge-Kutta yöntemi (4.Mertebeden) | 25 |
| 3.4.3. | Trapez (yamuk) yöntemi | 26 |
| 3.4.4. | Analitik çözüm yöntemi | 27 |
| 3.4.4.1. | Durum geçiş matrisinin bulunması | 29 |
| 3.5. | Güç Sistemlerinde Kararlılık | 30 |
| 3.5.1. | Temel kavramlar | 30 |
| 3.5.2. | Küçük işaret veya sürekli hal kararlılığı | 31 |
| 3.5.3. | Geçici hal kararlılığı | 31 |
| 3.5.4. | Dinamik hal kararlılığı | 31 |
| 3.5.5. | Denge noktası | 31 |

3.5.6. Durum denklemleri yöntemiyle güç sistemlerinin kararlılık analizi……. 32
3.6. Güç Sistemlerinin Geçici Rejim Analizi……... 33
3.7. Güç Sistemleri Analizinde Kullanılan Bilgisayar Programları….. 36
3.7.1. MATLAB programı……..…….. 36
3.7.2. EMTP-ATP programı……... 36
4. UYGULAMALAR VE SONUÇ……...……...……. 37
4.1. Uygulamalara Giriş……..……. 37
Uygulama 4.1…… 37
Uygulama 4.2…… 52
Uygulama 4.3…… 66
Uygulama 4.4…… 79
Uygulama 4.5…… 92
4.2. Sonuç……...……... 105
5. KAYNAKLAR……... 107
6. EKLER…… 108
Ek.1. İletim hattı durum denklemleri, nümerik integral ve analitik çözüm yöntemi kodları CD……..…… 108
ÖZGEÇMİŞ…… 109

## ŞEKİLLER LİSTESİ

**sayfa**


Şekil 3.1. Modern güç siteminin tek hat şeması örneği……..... 6
Şekil 3.2. Sistem modelleme aşaması şeması…… 7
Şekil 3.3. Kısa iletim hattı eşdeğer devresi..…… 8
Şekil 3.4. Orta uzunluktaki hattın eşdeğer devresi……..,.. 9
Şekil 3.5. π ve T eşdeğer devreleri……... 10
Şekil 3.6. İletim Hattı π eşdeğer devresi…….. 10
Şekil 3.7. Hat sonu omik yük durumu ……..…… 13
Şekil 3.8. Hat sonu endüktif yük durumu …….. 15
Şekil 3.9. Hat sonu kapasitif yük durumu ……..…….... 17
Şekil 3.10. Euler yöntemi grafiği……..... 23
Şekil 3.11. Runge Kutta yöntemi grafiği…… 25
Şekil 3.12. Trapezoidal yöntemi grafiği……... 26
Şekil 3.13. Birim basamak yanıtı……..... 34
Şekil 3.14. Dalga sönüm çeşitleri……... 35
Şekil 4.1. Uygulama 4.1 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi.. 41
Şekil 4.2. Uygulama 4.1 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı…. 41
Şekil 4.3. Uygulama 4.1 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi……..…….. 42
Şekil 4.4. Uygulama 4.1 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen kaynak akımı…… 42
Şekil 4.5. Uygulama 4.1 için Trapez yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 43
Şekil 4.6. Uygulama 4.1 için Trapez yöntemi ile elde edilen kaynak akımı… 44
Şekil 4.7. Uygulama 4.1 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 45
Şekil 4.8. Uygulama 4.1 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen kaynak akımı……..…….. 45
Şekil 4.9. Uygulama 4.1 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilimi……..……. 46
Şekil 4.10. Uygulama 4.1 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı…… 46
Şekil 4.11. Uygulama 4.1'e ait n=5 için hat sonu gerilimi…… 47
Şekil 4.12. Uygulama 4.1'e ait n=5 için kaynak akımı……. 47
Şekil 4.13. Uygulama 4.1'e ait n=10 için hat sonu gerilimi……. 48
Şekil 4.14. Uygulama 4.1'e ait n=10 için kaynak akımı……. 48
Şekil 4.15. Uygulama 4.1'e ait n=20 için hat sonu gerilimi……. 49
Şekil 4.16. Uygulama 4.1'e ait n=20 için kaynak akımı……. 49
Şekil 4.17. Uygulama 4.1'e ait A durum matrisinin özdeğerleri……. 50
Şekil 4.18. Uygulama 4.1 kararlılık grafiği……..…… 51
Şekil 4.19. Uygulama 4.2 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi 56
Şekil 4.20. Uygulama 4.2 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı….. 56
Şekil 4.21. Uygulama 4.2 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 57
Şekil 4.22. Uygulama 4.2 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen kaynak akımı……. 57

Şekil 4.23. Uygulama 4.2 için Trapez yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 58
Şekil 4.24. Uygulama 4.2 için Trapez yöntemi ile elde edilen kaynak akımı… 59
Şekil 4.25. Uygulama 4.2 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilim……... 60
Şekil 4.26. Uygulama 4.2 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen kaynak akımı……. 60
Şekil 4.27. Uygulama 4.2 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilimi……. 61
Şekil 4.28. Uygulama 4.2 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı……. 61
Şekil 4.29. Uygulama 4.2'ye ait n=20 için hat sonu gerilimi…… 62
Şekil 4.30. Uygulama 4.2'ye ait n=20 için kaynak akımı…….. 63
Şekil 4.31. Uygulama 4.2'nin A durum matrisinin özdeğerleri..... 64
Şekil 4.32. Uygulama 4.2 kararlılık grafiği……. 65
Şekil 4.33. Uygulama 4.3 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi.. 69
Şekil 4.34. Uygulama 4.3 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı….. 70
Şekil 4.35. Uygulama 4.3 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 71
Şekil 4.36. Uygulama 4.3 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen kaynak akımı……. 71
Şekil 4.37. Uygulama 4.3 için Trapez yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 72
Şekil 4.38. Uygulama 4.3 için Trapez yöntemi ile elde edilen kaynak akımı… 72
Şekil 4.39. Uygulama 4.3 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 73
Şekil 4.40. Uygulama 4.3 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen kaynak akımı……. 74
Şekil 4.41. Uygulama 4.3 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilim……... 75
Şekil 4.42. Uygulama 4.3 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı……. 75
Şekil 4.43. Uygulama 4.3'e ait n=20 için hat sonu gerilimi……. 76
Şekil 4.44. Uygulama 4.3'e ait n=20 için kaynak akımı……. 76
Şekil 4.45. Uygulama 4.3'ün A durum matrisinin özdeğerleri……..... 77
Şekil 4.46. Uygulama 4.3 kararlılık grafiği……. 78
Şekil 4.47. Uygulama 4.4 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi 82
Şekil 4.48. Uygulama 4.4 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı….. 83
Şekil 4.49. Uygulama 4.4 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 84
Şekil 4.50. Uygulama 4.4 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen kaynak akımı……. 84
Şekil 4.51. Uygulama 4.4 için Trapez yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 85
Şekil 4.52. Uygulama 4.4 için Trapez yöntemi ile elde edilen kaynak akımı… 85
Şekil 4.53. Uygulama 4.4 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 86
Şekil 4.54. Uygulama 4.4 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen kaynak akımı……. 86

Şekil 4.55. Uygulama 4.4 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 87
Şekil 4.56. Uygulama 4.4 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı……. 88
Şekil 4.57. Uygulama 4.4'e ait n=20 için hat sonu gerilimi…….. 89
Şekil 4.58. Uygulama 4.4'e ait n=20 için kaynak akımları…… 89
Şekil 4.59. Uygulama 4.4'ün A durum matrisinin özdeğerleri……. 90
Şekil 4.60. Uygulama 4.4'ün kararlılık grafiği……. 91
Şekil 4.61. Uygulama 4.5 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi 95
Şekil 4.62. Uygulama 4.5 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı….. 95
Şekil 4.63. Uygulama 4.5 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 96
Şekil 4.64. Uygulama 4.5 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen kaynak akımı……. 97
Şekil 4.65. Uygulama 4.5 için Trapez yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi 98
Şekil 4.66. Uygulama 4.5 için Trapez yöntemi ile elde edilen kaynak akımı… 98
Şekil 4.67. Uygulama 4.5 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi…….. 99
Şekil 4.68. Uygulama 4.5 analitik çözüm yöntemi ile elde edilen kaynak akımı……. 99
Şekil 4.69. Uygulama 4.4 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilimi……..... 100
Şekil 4.70. Uygulama 4.5 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı……. 101
Şekil 4.71. Uygulama 4.5'e ait n=20 için hat sonu gerilimi……. 102
Şekil 4.72. Uygulama 4.5'e ait n=20 için kaynak akımları…… 102
Şekil 4.73. Uygulama 4.5'in A durum matrisinin özdeğerleri…….. 103
Şekil 4.74. Uygulama 4.5.in kararlılık grafiği…….. 104

## ÇİZELGELER LİSTESİ

**sayfa**


| | | |
|---|---|---|
| Çizelge 4.1. | Uygulama 4.1'e ait hat parametreleri..... | 38 |
| Çizelge 4.2. | Uygulama 4.1 için kullanılan Yöntemler hata oranları..... | 51 |
| Çizelge 4.3. | Uygulama 4.1'e ait grafiklerin elde edilme süreleri..... | 52 |
| Çizelge 4.4. | Uygulama 4.2' deki iletim hattına ait hat parametreleri..... | 53 |
| Çizelge 4.5. | Uygulama 4.2'ye ait grafiklerin elde edilme süreleri…….... | 65 |
| Çizelge 4.6. | Uygulama 4.3' deki iletim hattına ait hat parametreleri..... | 67 |
| Çizelge 4.7. | Uygulama 4.3'e ait grafiklerin elde edilme süreleri……. | 78 |
| Çizelge 4.8. | Uygulama 4.4' deki iletim hattına ait hat parametreleri……..... | 80 |
| Çizelge 4.9. | Uygulama 4.4'e ait grafiklerin elde edilme süreleri……..... | 91 |
| Çizelge 4.10. | Uygulama 4.5' deki iletim hattına ait parametreler……..... | 93 |
| Çizelge 4.11. | Uygulama 4.5'e ait grafiklerin elde edilme süreleri……. | 104 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| $A$ | Amper |
| $I$ | Birim matris |
| $\lambda$ | Matris özdeğeri |
| H | Özvektör matrisi |
| $\Phi(t)$ | Durum geçiş matrisi |
| $x_h(t)$ | Homojen denklemin [$t_0$, t) aralığındaki çözümü |
| $x_ö(t)$ | Zorlanmış çözüm |
| $u(t)$ | Güç Kaynağı |
| $det$ | Matris determinantı |
| $e^{At}$ | Üstel matris |
| $t$ | Zaman sabiti |
| $V$ | Volt |
| $a_{ij}$ | Bir matrisin i. Satır, j. Sütün elemanı |
| $\xi$ | Sönüm oranı |
| $i$ | Akım |
| $\alpha$ | Zayıflama sabiti |
| j | Karmaşık sayı indisi |
| $t_r$ | Yükselme zamanı |
| $\tau$ | Gecikme zamanı |
| lim | Limit işlemi |
| $\infty$ | Sonsuz işareti |
| $y_t(t)$ | Geçici hal yanıtı |
| $y_{ss}(t)$ | Sürekli hal yanıtı |
| $cos$ | Kosinüs fonksiyonu |
| $Z_0$ | Karakteristik empedans |
| $I_s$ | Kaynak akımı |
| $V_r$ | Hat sonu gerilimi |
| $u_i$ | Gelen gerilim dalgası |
| $n$ | Toplu parametreli devre sayısı |
| $U_0$ | Sabit gerilim kaynağı |
| $h$ | Adım aralığı |
| $\Gamma$ | Yansıma oranı |
| $dB$ | Desibel |
| $np$ | Neper |

# 1.GİRİŞ

Enerji iletim hatları, elektrik güç sistemlerinin en önemli kısımlarından biridir. Enerji iletim hatlarında, geçici rejim durumunda oluşan aşırı akım ve gerilimlerin bilinmesi kesicilerin tasarımı, yalıtım derecesinin belirlenmesi ve sistem aygıtlarının korunması için gereklidir. Enerji tüketimindeki büyüme, iletim geriliminin seviyesini de arttırmayı gerektirmektedir. Bu artışa paralel olarak, enerji iletim sistemlerindeki çeşitli açma-kapama ve arıza ile yıldırım düşmesi durumunda meydana gelen aşırı akım ve gerilimler ile ilgili çalışmalar daha da önemli hale gelmektedir. Ancak, enerji iletim hatlarının geçici rejimlerinin analitik olarak hesaplanması sınırlı durumlar için mümkündür. Bilgisayar sistemlerinin yaygınlaşması ile çeşitli nümerik Yöntemler geliştirilmiştir. Fakat kullanılan nümerik yönteme göre değişen çeşitli sınırlamalar mevcuttur.

Güç sistemlerinde açma kapama olayları sırasında oluşan aşırı gerilim ve akımlar iletim hatları, güç transformatörleri ve şalt cihazları üzerinde büyük zararlara neden olabilmektedir. Bu zararlara karsı gereken önlemleri almak için sistemde meydana gelebilecek en yüksek gerilim değerlerini hesaplayıp, koruma sistemlerini bu değerlere göre tasarlamak ve ayarlamak gerekir [1]. Geçici rejim cevaplarının istenilen hassasiyette elde edilebilmesi için, enerji iletim hattına ait parametrelerin detaylı olarak temsil edilmesi ve geçici rejim analizinin zaman bölgesinde yapılması gerekir. Laboratuar şartlarında böyle bir açma kapama olayını temsil etmek oldukça pahalı ve zor bir iştir, buna karşılık bilgisayar kullanarak geçici aşırı gerilimlerin ve geçici hal esnasında kaynak akımının hesaplanması ve ilgili dalga şekillerinin elde edilmesi hem oldukça ekonomik, hem de büyük kolaylık ve zaman tasarrufu sağlamıştır.

Bu çalışmada, güç sisteminde bir faza enerji verilmesi sırasında meydana gelen kapama aşırı gerilimleri ve kaynak akımları beş farklı uygulama yapılarak incelenmiş ve sistemlerin kararlılık analizleri yapılmıştır. Geçici rejim olayı genellikle iletim hatlarında meydana geldiğinden, iletim hattı π modeli baz alınarak, durum uzay teknikleri ile iletim hatlarında meydana gelen geçici rejim durumları incelenmiştir.

Uygulamalar için bulunan durum denklemleri, MATLAB programı kullanılarak yazılan algoritmalarla, sayısal ortamda kullanılabilecek şekilde elde edilmiş ve yine MATLAB programı kullanılarak hazırlanan nümerik integral

(Euler yöntemi, Trapez yöntemi, Runge Kutta yöntemi) ve analitik çözüm yöntemi algoritmaları kullanılarak, elde edilen bu durum denklemleri çözülmüştür. Nümerik integral ve analitik çözüm yöntemlerinden elde edilen bu sonuçlar, EMTP-ATP programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak kullanılan yöntemlerin hata oranları ile sonuç verme süreleri bulunmuş, bu sonuçlara bakılarak kullanılan yöntemlerin hassasiyetleri belirlenmiştir.

## 2.KAYNAK ÖZETLERİ

İ. Eker tarafından yapılan bu çalışmada [2], enerji iletim hatlarında kısa devre esnasında meydana gelen geçici akım ve gerilimler incelenmiştir. Çözüm yöntemi olarak yenilenmiş Fourier dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Geçici akım ve gerilimlerin matematiksel denklemleri önce frekans bölgesinde elde edilmiştir. Daha sonra ters Fourier yöntemi uygulanarak çözümler zaman bölgesinde bulunmuştur. Kaynak empedansı, hat uzunluğu, arıza direnci ve arızanın olduğu yerin kısa devre akımı ve gerilimleri üzerindeki etkilerini çeşitli kısa devre arızaları için analiz edilmiştir. Ayrıca, geçici akım ve gerilimlerin çözümünde toprağın da etkisi göz önünde alınmıştır. Geçici akım ve gerilimlerin eğrileri bilgisayar kullanarak elde edilmiştir.

M. S. Mamiş tarafından yapılan bu çalışmada [3], durum uzayı tekniği kullanılarak iletim hatlarının kalıcı ve geçici rejim analizi incelenmiştir. Enerji iletim hatları çok sayıda toplu parametreli devrelerin birbirine bağlantısı olarak düşünülmüştür. Bu yaklaşımda kapasitans gerilimleri ve endüktans akımları durum değişkeni seçilerek sistemin durum uzayı denklemleri bulunmuştur. Bu denklemler iletim hatlarının çeşitli yük ve kaynak sonlandırılmalı altında kalıcı ve geçici çözümlerini bulmak için durum uzayı teknikleri kullanılarak çözülmüştür. Gerek formülasyon, gerekse çözüm kısımları Fortran programları dilini kullanarak sayısal bir bilgisayarda yapılmak üzere programlanmıştır. Hazırlanan programı tanıtmak ve toplu-parametreler yaklaşımının farklı yönlerini göstermek için birkaç örnek üzerinde çalışılmıştır. Diğer bazı Yöntemlerle yapılan karşılaştırmada, bu yöntemin bazı üstün özelliklerinin olduğu gösterilmiştir.

E. Erçelebi tarafından yapılan bu çalışmada [4], enerji iletim hattı, yeraltı güç kablosu ve trafo içeren sisteme yıldırım düşmesi sonucu meydana gelen manevra aşırı gerilimleri incelenmiştir. Sistemin değişik işletme koşullarını temsil eden çeşitli durumları ele alınmıştır. Kablo uzunluğu ve nakil hattı uzunluğu gibi çeşitli sistem parametrelerinin meydana gelen geçici aşırı gerilimler üzerine olan etkileri incelenmiştir. Yıldırım darbesi çift üstel dalga şeklinde ifade edilmiştir. Çözüm yöntemi olarak yenilenmiş Fourier dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Sistemin transfer fonksiyonunun matematiksel formülasyonu elde edilirken sistem

parametrelerinin frekansa bağımlılığı göz önüne alınmıştır; çözüm modal teori ve yenilenmiş Fourier dönüşüm yöntemi vasıtasıyla elde edilmiştir. Bu çalışmada değişik cephe ve sırt zamanları olan dalgalar incelenmiştir. Yıldırım faz iletkenine ve toprak iletkenine düşmesi sonucu meydana gelen aşırı gerilimler ayrı ayrı incelenmiştir.

M. S. Mamiş tarafından yapılan bu çalışmada [5], durum uzayı tekniği kullanılarak çok fazlı iletim hatlarının kalıcı ve geçici rejimleri incelenmiştir. Enerji hatları çok sayıda toplu parametreli devrelerin birbirine bağlantısı şeklinde düşünülmüştür. Bu yaklaşımla kapasite gerilimleri ve endüktans akımları durum değişkeni seçilerek sistemin durum uzayı denklemleri formüle edilmiştir. Bu denklemler iletim hatlarının çeşitli yük ve kaynak sonlandırılmaları altında kalıcı ve geçici çözümlerini bulmak için durum uzayı teknikleri kullanılarak çözülmüştür. $e^{At}$'nin hesaplanması ve bununla ilgili özdeğer problemi üzerinde durulmuştur. İşlemlerin gerek formülasyon, gerekse çözüm kısımları için durum uzayı tekniği temel alınarak LPTLAP bilgisayar programı geliştirilmiştir. Hazırlanan programı tanıtmak ve toplu-parametreler yaklaşımının farklı yönlerini göstermek için çeşitli örnekler üzerinde çalışılmış ve elde edilen sonuçların bir bölümü EMTP (Electromagnetic Transients Program) ve FILT (Fast Inverse Laplace Transform) ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan yöntemin iletim hatlarının geçici rejim analizinde bazı üstün özelliklerinin olduğu gösterilmiştir.

Y. C. Evrenosoğlu tarafından yapılan bu çalışmada [6], elektrik güç sistemlerinde geçici kararlılık probleminin çözümlenmesine neden gerek duyulduğu ve çözümlemenin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Elektrik güç sisteminin klasik ve ayrıntılı modelleri ayrı ayrı ele alınmış ve her iki model için de IEEE'nin örnek 3 generatörlü 9 baralı sistemi üzerinde geçici kararlılık çözümlemesi yapılmıştır. Klasik modelin yetersizliği nedeniyle ayrıntılı model üzerinde durulmuştur. Ayrıntılı model kullanılarak elde edilen sistemin çözümünde cebrik hale dönüştürülen diferansiyel denklemler ile doğrusal olmayan cebrik denklem sisteminin beraber çözümünde kullanılan Newton-Raphson yönteminde ortaya çıkan doğrusal denklem sisteminin çözümü için yinelemeli çözüm tekniklerinin kullanılabilirliği incelenmiştir. Çözümleme sonuçları generatör açılarını ve açı farklarını içeren grafikler

çizdirilmiştir. Çözümleme için gerekli olan algoritmalar MATLAB programı ile yazılmıştır.

V. Doğruer tarafından yapılan bu çalışmada [7], güç sistemlerinin kısa devre analizinin geçici rejim, koruma röleleri ve enerji iletim hattı iletken seçimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, güç sistemlerinde olması muhtemel faz-toprak, faz-faz, iki faz-toprak ve üç faz kısa devre arızalarının gerçek hat parametreleriyle, MATLAB Simulink kullanarak modellenmesi yapılmış ve Simulink' te tasarlanan simülasyon modeli ile kısa devre arıza analizleri incelenmis ve simülasyon sonuçları verilmistir.

S. Koç tarafından yapılan bu çalışmada [8], enerji iletim hatlarında kısa devre sonucu olusan asimetrik ve simetrik arzalar incelenmiştir. Üç fazlı arıza simetrik; tek faz-toprak, faz-faz ve iki faz-toprak arızaları da asimetrik arıza olarak tanımlanır. Simetrik ve asimetrik arızalarının analizini yapmak amacıyla gelistirilen Yöntemlerdan birisi de simetrili bilesenler yöntemidir. Bu çalısmada, simetrili bilesenler yöntemiyle arızaların hesaplanması gerçeklestirilmistir. Hesaplamada arıza sartlarını belirlemek amacıyla bir model devrenin benzetimi kullanılmıstır. MATLAB/GUI tabanlı bir arıza hesaplama programı gelistirilmistir. Bu ara yüz üzerinde, devrede bulunan elemanların dizi reaktanslarının girilmesi için kısımlar olusturulmuş ve arıza seçenekleriyle arıza akım ve gerilimleri hesaplanmıstır.

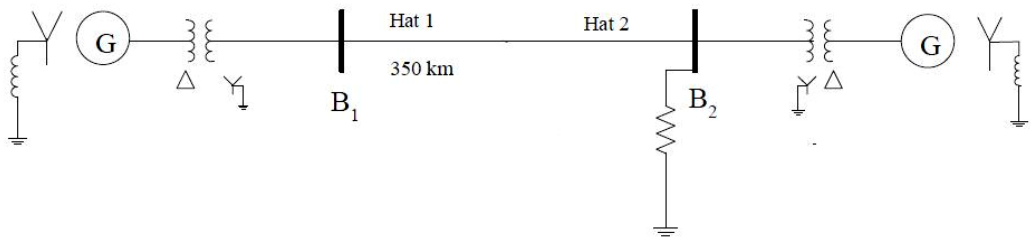
# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

## 3.1. Güç Sistemleri

### 3.1.1. Güç sistemleri analizi

Şekil 3.1'de modern bir güç sistemi örneği görülmektedir. Üretim merkezlerinde üretilen elektrik enerjisi, hatlar, transformatörler, kesiciler vs. cihazlardan oluşan karmaşık bir ağ üzerinden müşterilere ulaştırılmaktadır.

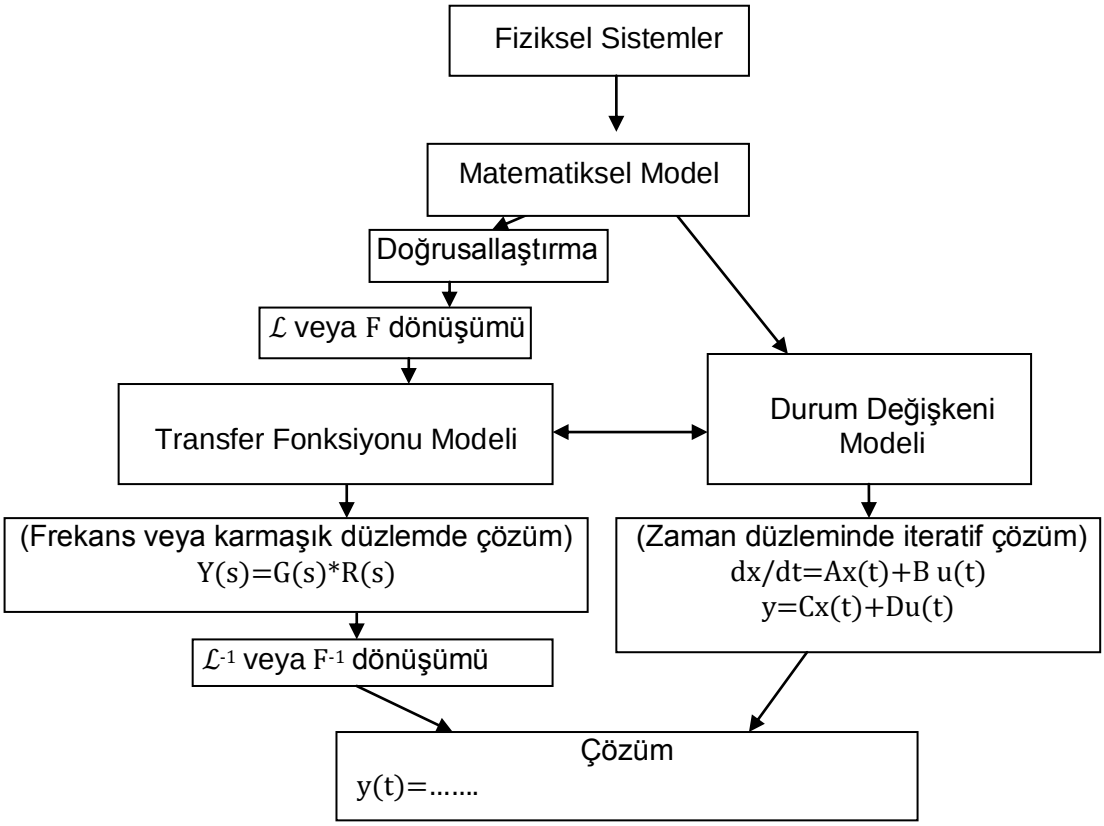
Güç sistemleri analizi yapılırken, genellikle üç fazlı bir normal taşıma sistemi, hesaplamalarda kolaylık olması açısından bir faz ve bir nötrden ibaret olduğu varsayılır. Dengeli bir sistemde nötr iletkeninden akım geçmeyeceği için nötr hattını da ihmal etmek mümkündür [9].




*Şekil 3.1. Modern güç sitemi tek hat şeması örneği*

### 3.1.2.Güç sistemlerinin modellenmesi

Matematik modelleme yaklaşımı sistemlerin daha iyi anlaşılması, analiz edilmesi ve dizayn edilmesinin etkin ve ekonomik bir yoludur. Modelleme karmaşık parametrelerin belirlenmesi için iyi tanımlamalara dayanır. Çünkü karmaşık olaylar ancak bu şekilde matematik ifadeler şeklinde getirilebilir. Bu ise iyi bir matematik bilgi ve tecrübeyi gerektirir. Şekil 3.2'de modelleme şeması görülmektedir.




*Şekil 3.2. Sistem modelleme aşamaları şeması*

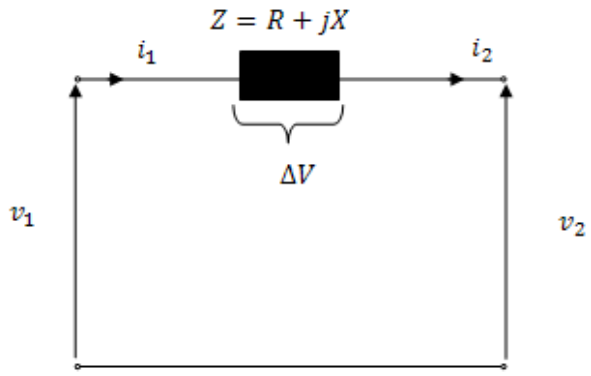
### 3.2.Enerji İletim Hatları

Elektrik enerjisi genelde bakır veya alüminyumdan yapılmış havai hatlarla veya yine aynı özelliklere sahip metallerden imal edilmiş kablolarla gerçekleştirilmektedir. Güç sistemleri için gerekli olan parametreler; hat üzerinde yayılmış olarak bulunan direnç, kapasitans, endüktans, kondüktans olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin ilk üçü geçici rejim analizinde dikkate alınmaktadır. Fakat pratik nedenlerle bu değerler birleştirilerek veya belirli uzunluklarla dağıtılarak hesaplanmaktadır. Bu parametreler iletkenlerin elektriki özelliklerine, havai hatları taşıyan direklerin fiziki yapısına, yer altı kablolarının düzenleniş biçimine, iletkenlerin yer aldığı ortamın özelliklerine bağlıdırlar. Bu özelliklere bağlı olarak her bir parametre çeşitli teknikler kullanılarak hesaplanabilir. Enerji iletim hatları uzunluklarına göre üçe ayrılabilirler. $0-100\ km$'ye kadar olanlara kısa iletim hatları, $100-250\ km$ arası olan hatlara orta uzunluktaki iletim hatları, $250\ km$ ve daha uzun olanlara ise uzun iletim hatları denir. İletim hatlarını elektriksel yönden incelendiğinde, hat parametreleri

ve uzunluğun bilinmesi önemlidir. Çalışmalar genellikle alternatif akım kullanılan iletim hatları olduğundan alternatif akımda kullanılan tüm büyüklükler burada söz konusu olacaktır. Örneğin iletim hatlarının omik direnci ($R$) 50 Hz alternatif akımda doğru akımdakine oranla yaklaşık 1,3 katı daha fazladır. Bunun sebebi deri etkisidir. Diğer taraftan komşu iletkenlerden akan akımların halkaladığı akılar nedeniyle, faz iletkenlerinin self (öz) ve karşılıklı (ortak) endüktansları meydana gelmektedir. Sinüzoidal akımlarla çalışıldığından endüktans deyimi yerine şebeke frekansının bir fonksiyonu olan endüktif reaktans kullanılır. Hattın omik direnci ve endüktif reaktansı birbirlerine seri bağlı olarak düşünülür ve hattın karakterize edilmesi için bu iki büyüklüğün seri toplamı empedans kullanılır. Öte yandan yalıtkan ortam (hava) içinde bulunan hatlarının birbirlerine veya toprağa göre kaçak kapasiteleri bulunmaktadır. Sinüzoidal bir gerilimle çalışıldığı için, frekansın bir fonksiyonu olan kapasitif reaktans deyimi kullanılır. Ancak hesaplarda tutulan genel yol, kapasitif reaktans yerine, bunun tersine eşit olan süseptans ile çalışılmaktadır. İletkenlerin toprağa karşı olan kaçak dirençleri çok küçük olduğu için çoğunlukla ihmal edilir. Bu bakımdan hattın kapasitesi, hat ile toprak arasına bağlanmış süseptans ile daha genel anlamda ise admitans ile temsil edilir.

### 3.2.1. Kısa uzunluktaki hatlar

Normal yapıda ve boyları $0 - 100\ km$ arasında değişen hatlar için kalıcı rejimde kapasite ihmal edilebilir. Şekil 3.3'de kalıcı rejim analizinde kullanılabilecek bir kısa iletim hattı şeması yer almaktadır.




*Şekil 3.3. Kısa iletim hattı eşdeğer devresi*

Bu empedansın değeri;

$$Z = R + jX = z\ell = r\ell + jx\ell\ \Omega \tag{3.1}$$

olarak bulunur. Burada;

$Z$: Hattın faz başına ohm olarak seri empedansını

$z$: Hattın birim uzunlukta ve faz başına ohm olarak seri empedansını

$X$: Hattın faz başına ohm olarak toplam endüktif reaktansı

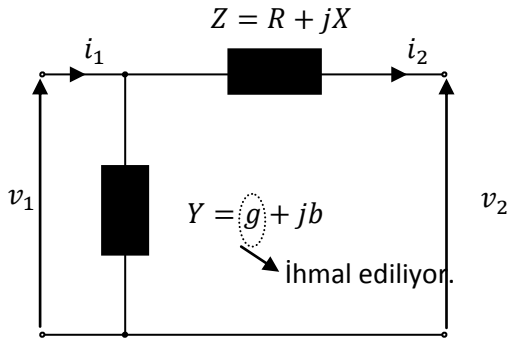
$x$: Hattın birim uzunlukta ve faz başına ohm olarak endüktif reaktansı

$\ell$ : Hattın uzunluğunu

göstermektedir. Kısa iletim hattı eşdeğer devresi basit bir AC devresi olarak çözülür. Devrede şönt kollar olmadığı için hat başı ve hat sonu akımları bir birine eşittir.

### 3.2.2. Orta uzunluktaki iletim hatları

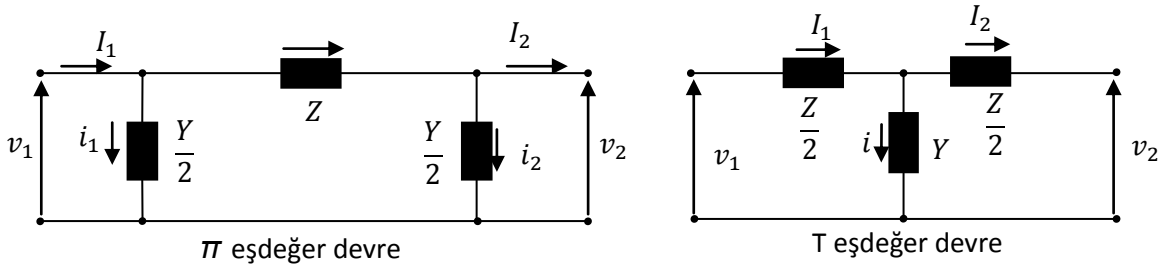
Uzunlukları $100 - 250\ km$ arasında değişen hatlar orta uzunluktaki iletim hatları olarak tanımlanırlar. Kalıcı rejim analizinde tamamen kapasite olan şönt admitans orta uzunluktaki hatların hesaplanmasında dikkate alınır. Eşdeğer devre Şekil 3.4'de gösterildiği gibidir.




*Şekil 3.4. Orta uzunluktaki iletim hattı eşdeğer devresi*

Bu tür hatların çözülmesinde π ve T eşdeğer devrelerinden yararlanılır. Hattın şönt admitansı hattın baş ve sonlarında iki eşit parçaya bölünerek yerleştirilirse, elde edilen devreye nominal π devresi; hattın toplam şönt admitansı hattın ortasına, seri empedans da eşit iki parçaya bölünerek bu şönt

admitansın sağına ve soluna yerleştirildiğinde elde edilen devreye T devresi denilir. Şekil 3.5'te nominal π ve T devreleri gösterilmiştir.

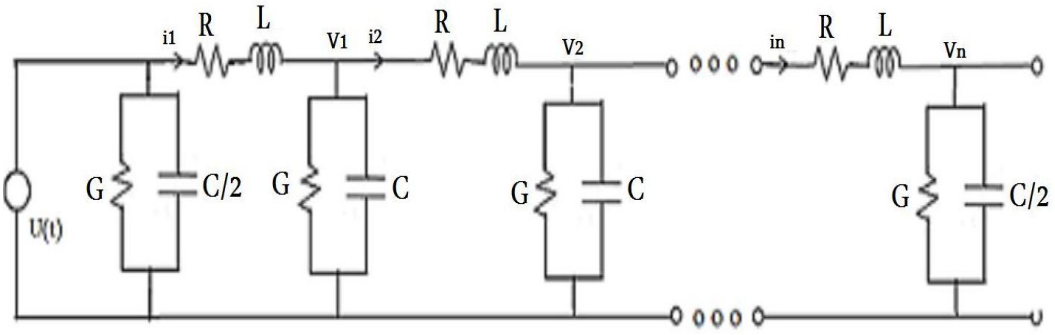



*Şekil 3.5. π ve T eşdeğer devreleri*

### 3.2.3. Uzun iletim hatları

Uzunlukları $250\,km$ den büyük olan hatlar uzun iletim hatları olarak tanımlanırlar. Nominal π ve nominal T devresi olarak temsil edilebilirler. Geçici rejim analizinde dağınık parametreli veya toplu parametreli π ve T eşdeğer devre modelleri kullanılır.

Bu çalışmada, iletim hattının π eşdeğer devresi kullanılarak geçici rejim analizi yapılmıştır. π eşdeğer devre Şekil 3.6 da gösterilmiştir.




*Şekil 3.6. İletim hattı π eşdeğer devresi*

### *3.2.4.* İletim özellikleri

#### *3.2.4.1. Zayıflama*

Zayıflama, bir noktadan diğer bir noktaya aktarılan bilgi işaretinin genliğinin düşmesi olarak tarif edilebilir. İletim hatlarında zayıflama genellikle

Neper birimiyle ifade edilir. Giriş ve çıkış işaretlerine ilişkin gerilim değerlerinin oranının Neper ve Desibel cinsinden ifadeleri sırasıyla

$$\alpha = ln\left(\frac{V}{V_r}\right)\ np \tag{3.2}$$

$$\alpha = 20\log_{10}\left(\frac{V}{V_r}\right)\ \mathrm{dB} \tag{3.3}$$

Dalganın yayılma sabiti ise,

$$\gamma = \sqrt{(\mathrm{R} + \mathrm{jwL})(\mathrm{G} + \mathrm{jwC})} = \alpha + j\beta \tag{3.4}$$

ile tanımlanır. $\left(\frac{V}{V_r}\right)$ oranı gerilim zayıflamasını; bunun tersi, yani $\left(\frac{V_r}{V}\right)$oranı ise, gerilim kazancını tanımlar. $1\,Neper = 8.68\,dB'$ e eşdeğerdir. $Neper$ ve $dB$ logaritmik birimler olup logaritmik birimlerin kullanımı zayıflama ve kazancın daha kolay yorumlanabilmesi açısından önemlidir [10].

Fiziksel bir iletim hattında zayıflatma, hattın yapısını oluşturan seri direnç ve paralel iletkenlikten dolayı meydana gelir. Seri direnç ve paralel iletkenliği yüksek olan bir iletim hattı yüksek bir zayıflatmaya sahiptir ve böyle bir iletim hattı yüksek kayıplı hat olarak adlandırılır. Eğer iletim hattının yapısında var olan seri direnç ve paralel iletkenlerin değeri küçük ise, böyle bir iletim hattına düşük kayıplı hat adı verilir.

### 3.2.4.2. Yayılma hızı

Bir iletim hattı boyunca elektriksel işaret formunda gönderilen bilgi, hattın sonuna belli bir sürede ulaşacaktır. Tipik bir koaksiyel kabloda bir elektriksel işaretin iletim hızı, $2.10^8\ m/s$ ile $3.10^8\ m/s$ aralığındadır. Buna göre, bilginin hattın sonuna ulaşması için geçen süre metre başına $5\ ns$ ile $3.33\ ns$ arasında değişecektir. Hattın iletim hızı, uzunluk ve boyut gibi hattın fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bir iletim hattının iletim hızı,

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{3.5}$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada $L$ ve $C$ hattın birim uzunluğundaki endüktans ve kapasite değerleridir. Buna göre birim uzunluktaki zaman gecikmesi;

$$D = \sqrt{LC} \tag{3.6}$$

ifadesiyle hesaplanır.

### 3.2.4.3 Karakteristik empedans

Sonsuz uzunlukta kabul edilen bir hattın başından ölçülen empedans değerine karakteristik empedans denir. Karakteristik empedans hattın fiziksel parametrelerine bağlıdır. Bu fiziksel parametreleri elektriksel büyüklüklerle ifade etmek mümkündür. Karakteristik empedansı hat parametrelerine bağlı olarak bulunur. Yaklaşık karakteristik empedans;

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{R+jwL}{G+jwC}} \tag{3.7}$$

formülüyle hesaplanır. Burada $\omega$ , $2\pi f$ biçiminde açısal frekansı göstermektedir. Bir iletim hattının karakteristik empedansının düşük ve yüksek frekanslarda alabileceği değerler yaklaşık olarak;

$$Z_0 = \begin{cases} \sqrt{\frac{R}{G}} & jwL \ll R \;\; ve \; jwC \ll G \; veya \; w = 0 \\ \sqrt{\frac{L}{C}} & jwL \gg R \;\; ve \; jwC \gg G \end{cases} \tag{3.8}$$

şeklinde hesaplanır. Bu durumlarda karakteristik empedansın değeri reel bir sayı olacak ve karakteristik empedans rezistif bir davranış gösterecektir.

### 3.2.5. Yürüyen dalgaların yansıması ve kırılması

Enerji iletim hatları bütün uzunlukları boyunca homojen değildir. Hat sonu direnç, endüktans veya kapasite ile bağlı olabileceği gibi hattan kabloya veya paralel bağlı hatlara geçiş gibi kombinasyonlarla bağlanmış olabilir. Bütün bu

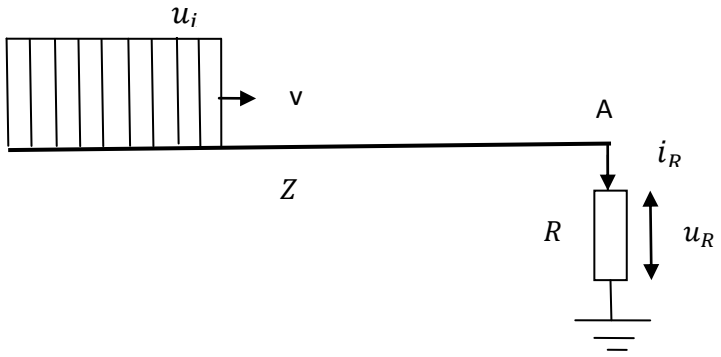
noktalar birer yansıma ve kırılma noktalarıdır. Yürüyen bir gerilim dalgası böyle bir noktada yansıma ve kırılmaya (geçirmeye) uğrar ve böylece hat üzerinde yeni dalgalar meydana gelir. Bu çalışmada, sırasıyla hat sonu açık devre, omik yük, endüktif yük ve kapasitif yüklü iken birinci yansıma ve kırılmadan sonraki dalganın değerleri incelenmiştir. Hat üzerinde yansıyan voltajın gelen voltaja oranına yansıma katsayısı denir. Yansıma katsayısı 0 ile 1 arasında değişir.

Yansıyan işaretin geriliminin iletilen işaretin gerilimine oranı, gerilim yansıma katsayısı olarak adlandırılır ve $\Gamma$ ile gösterilir.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{3.9}$$

### 3.2.5.1. Hat sonu omik yük durumu

Karakteristik empedansı $Z$ olan bir iletim hattının sonuna $R$ omik yükü Şekil 3.7'deki gibi bağlanmıştır.




*Şekil 3.7. Hat sonu omik yük durumu*

$u_i$ gerilim dalgası A noktasına gelince, $R$ direncinden dolayı yansır ve böylece $u_y$ yansıma gerilimi meydana gelir. $R$ direncinden dolayı geçen $i_R$ akımı A noktasındaki toplam gerilime bağlıdır. A noktası için;

$$u_A = u_i + u_y = u_R = R i_R \tag{3.10}$$

$$i_A = i_i + i_y = \frac{u_i}{Z} - \frac{u_y}{Z} = i_R \tag{3.11}$$

denklemleri elde edilmiştir. Denklem 3.11 düzenlendiğinde,

$$u_i - u_y = Zi_R \tag{3.12}$$

bulunmuştur. Denklem 3.10 ile denklem 3.12 toplandığında,

$$2u_i = i_R(R + Z) \tag{3.13}$$

$$i_R = \frac{2u_i}{R+Z} \tag{3.14}$$

$$u_R = \frac{2.R}{R+Z}\, u_i \tag{3.15}$$

elde edilmiştir. Denklem 3.15 ifadesi denklem 3.12'de yerine yazılırsa,

$$u_y = u_R - u_i = \frac{R-Z}{R+Z} u_i \tag{3.16}$$

ifadesi bulunmuştur. Gerilim ve akım yansıma katsayıları sırasıyla,

$$\Gamma = \frac{u_y}{u_i} = \frac{R-Z}{R+Z} \tag{3.17}$$

$$\Gamma = \frac{i_y}{i_i} = -\frac{R-Z}{R+Z} \tag{3.18}$$

şeklinde elde edilmiştir.

Hat sonu omik yük durumu için bazı özel durumlar aşağıdaki gibidir:

- $R = \infty$ olması hali (hat sonu açık devre );

Bu durumda gelen dalganın tamamı yansıyacağı için

$$i_R = 0\,, u_R = 2.u_i\,, \quad i_y = -i_i \;\; ve \; u_y = u_i$$

elde edilir.

- $R = 0$ olması hali (hat sonu kısa devre );

Bu durumda, gerilim yansıma katsayısı -1, akım yansıma katsayısı +1 olduğundan,

$$v_R = 0\,, i_R = 2.i_i\,, \quad i_y = i_i \;\; ve \;\; u_y = -u_i$$

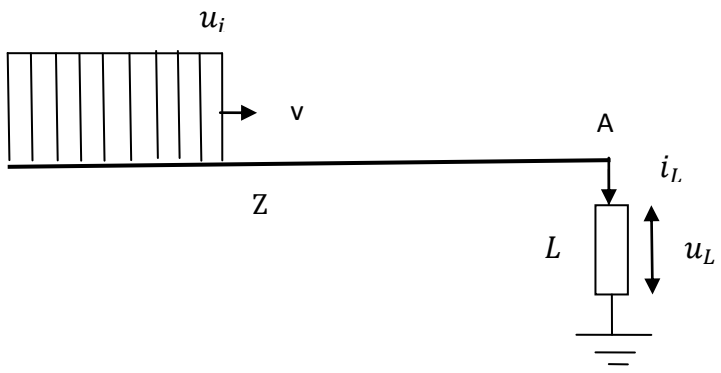
elde edilir.

• $R = Z$ olması hali (hat sonu karakteristik empedans bağlı );

Bu durumda gerilim ve akım dalgalarının tamamı kırılacağından herhangi bir yansıma olmaz [11].

### 3.2.5.2. Hat sonu endüktif yük durumu

Karakteristik empedansı $Z$ olan bir iletim hattının sonuna $L$ endüktif yükü Şekil 3.8'deki gibi bağlanmıştır.




*Şekil 3.8. Hat sonu endüktif yük durumu*

$u_i$ gerilim dalgası A noktasına gelince $L$ yükünden dolayı yansıma ve kırılmaya uğrar. A noktası için,

$$u_A = u_i + u_y = u_L = L\frac{di_L}{dt} \tag{3.19}$$

$$i_A = i_i + i_y = \frac{u_i}{Z} - \frac{u_y}{Z} = i_L \tag{3.20}$$

elde edilmiştir. Elde edilen bu denklemleri düzenlenip taraf tarafa toplayınca denklem 3.21 bulunmuştur.

$$2u_i = Zi_L + L\frac{di_L}{dt} \tag{3.21}$$

Eğer $u_i = U_0$ gerilimi sabit ise, denklem 3.21'in her iki tarafına Laplace dönüşümü uygulanınca,

$$\frac{2U_0}{s} = (Z + sL)I_L(s) \tag{3.22}$$

$$I_L(s) = 2\frac{U_0}{Z}\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s+a}\right) \tag{3.23}$$

elde edilmiştir. Denklem 3.23'e Ters Laplace dönüşümü uygulanarak $t$ domenine geçilir ve

$$I_L(t) = 2\frac{U_0}{Z}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = 2I_0\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \tag{3.24}$$

ifadesi bulunmuştur. Burada,

$$a = \frac{Z}{L} = \frac{1}{T} \tag{3.25}$$

$$u_L = L\frac{di_L}{dt} = 2U_0 e^{-\frac{t}{T}} \tag{3.26}$$

şeklinde elde edilmiştir. $u_i + u_y = u_L$ olduğundan, $u_y$ gerilimi için,

$$u_y = u_L - u_i = U_0(2\, e^{-\frac{t}{T}} - 1) \tag{3.27}$$

ve $i_y$ akımı için de,

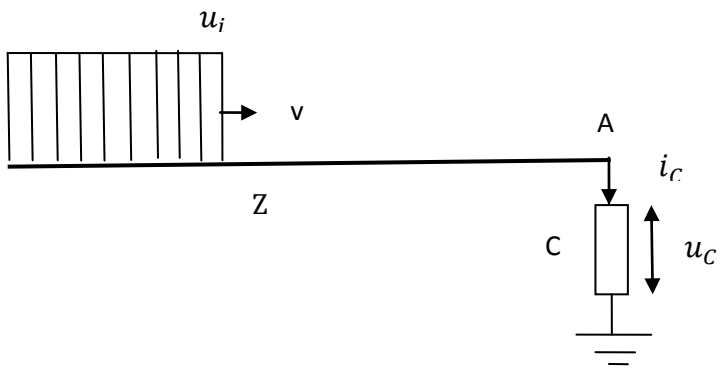
$$i_y = -\frac{u_y}{Z} = -\frac{U_0}{Z}\left(2e^{-\frac{t}{T}} - 1\right) = -I_0(2e^{-\frac{t}{T}} - 1) \tag{3.28}$$

$$\frac{i_y}{I_0} = 1 - 2e^{-\frac{t}{T}} \tag{3.29}$$

bulunmuştur.

### 3.2.5.3. Hat sonu kapasitif yük durumu

Karakteristik empedansı $Z$ olan bir iletim hattının sonuna $C$ kapasitif yükü, Şekil 3.9'daki gibi bağlanmıştır.




*Şekil 3.9. Hat sonu kapasitif yük durumu*

$$2u_i = Zi_C + \frac{1}{C}\int i_C dt \tag{3.30}$$

Denklemini çözerken $u_i = U_0$ sabit kaynak olduğu kabul edilerek ve denklem 3.30'un her iki tarafına Laplace dönüşümü uygulayarak denklem 3.31 bulunmuştur.

$$\frac{2U_0}{s} = \left(Z + \frac{1}{sC}\right) I_C(s) \tag{3.31}$$

$$I_C(s) = \frac{2U_0}{Z}\,\frac{1}{s+a} \tag{3.32}$$

Denklem 3.32 deki ifadenin her iki tarafına ters Laplace uygulayarak sırasıyla $i_C$ ve $u_C$ elde edilmiştir.

$$i_C(t) = \frac{2U_0}{Z}e^{-at} = \frac{2U_0}{Z}e^{-\frac{t}{T}} \tag{3.33}$$

$$u_C = \frac{1}{C}\int i_C\, dt = 2U_0(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \tag{3.34}$$

Burada, $a = \frac{1}{ZC} = \frac{1}{T}$ denklemde yerine yazılırsa, yansıyan gerilim ve akım dalgalarının değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$u_y = u_C - u_i = U_0 * (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \tag{3.35}$$

$$\frac{u_y}{u_i} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \tag{3.36}$$

$$\frac{i_y}{i_i} = e^{-\frac{t}{T}} - 1 \tag{3.37}$$

### 3.2.6. Yürüyen dalgaların zayıflaması

Yüksek gerilim hattının birim uzunluğuna düşen direnç $R$ ise $dx$ uzunluğundaki hattın direnci $R\,dx$ olur. Yürüyen dalgaların $dx$ kadar ilerlemesi halinde gücündeki $-dP$ azalması $dx$ hattındaki Joule kaybına eşittir. Yani,

$$-dP = i^2 R dx \tag{3.38}$$

elde edilir. Diğer taraftan $P = ui = Zi^2$ olduğundan,

$$-2Zi\,di = Zi^2 dx \tag{3.39}$$

bulunur. Denklem 3.39 kullanılarak,

$$\frac{di}{dx} + \frac{R}{2Z} i = 0 \tag{3.40}$$

elde edilir. Denklem 3.40'daki ifadenin her iki tarafına Laplace işlemi uygulandığında,

$$i = I_0 e^{-\alpha x} \tag{3.41}$$

bulunur. Denklem 3.41 de $x = vt$ ve $\alpha = \frac{R}{2Z}$ (zayıflama sabiti), yerlerine yazılarak,

$$i = i_0 e^{-\left(\frac{R}{2Z}\right)vt} = I_0 e^{-t/T} \tag{3.42}$$

$$u = U_0 e^{-\left(\frac{R}{2Z}\right)vt} = U_0 e^{-t/T} \tag{3.43}$$

$$T = \frac{2L}{R} \tag{3.44}$$

elde edilir.

## 3.3. Durum Uzay Denklemleri

### 3.3.1. Niçin durum uzay teknikleri kullanılır

Pratikte kontrol sistemleri, çok girişli çok çıkışlı ve oldukça kompleks olduğundan transfer fonksiyonu ile sistem dinamiğinin sınırlı modeli elde edilir. Dinamik sistemlerin modellemesinde kullanılan fakat 1960 yıllarında kontrol sistemleri için geliştirilen ve günümüzde modern kontrol sistemleri için kullanılan durum uzay tekniği, sistemin tüm dinamiğinin modellenmesine olanak sağlar.

Durum uzay tekniğinde, dinamik sistemlerin modellenmesinde üç değişken; giriş, çıkış ve durum değişkeni kullanılır. Dinamik sistemler (doğrusal ve doğrusal olmayan) bu üç değişken kullanılarak durum uzay denklemleri yâda kısaca durum denklemleri biçiminde matematiksel olarak modellenir.

Durum uzayı kavramı kullanılarak dizayn edilen bir sistem sayesinde, kontrol sistemleri verilen performans ölçütüne göre tasarlanabilir. Üstelik durum uzayında gerçekleştirilen tasarım, adım fonksiyonu, impuls fonksiyonu ve sinüzoidal fonksiyon gibi belirli birtakım girişlerin dışında kullanıcının tanımlayacağı işaretlerle de sınanabilir. Ayrıca durum uzayı Yöntemleri başlangıç koşullarını da tasarıma dâhil etmesine izin verir ki bu çok kullanışlı ve faydalı bir özelliktir.

Genel olarak iletim hatlarının analizinde zaman ve frekans domeni olmak üzere iki temel yöntem kullanılmaktadır. Zaman domeni yöntemlerinde frekans bağımlı parametrelerin çözüme dahil edilmesi zor olmaktadır. Diğer taraftan frekans domeni yöntemlerinde doğrusal olmayan elemanların ve durumların çözüme dahil edilmesi zaman domenindeki kadar kolay olmamaktadır [12]. Zaman domeninde çalışırken, durum uzay tekniği geleneksel yöntemlere nazaran daha basit ve kullanışlıdır. Örneğin Laplace dönüşümü ile *t* domeninden *s* domenine dönüşüm yapılarak devrenin transfer fonksiyonu rahatlıkla bulunur. Ancak tekrar *t* domenine geçmek için ters Laplace dönüşümü yapmak gerektiğinden ters Laplace dönüşümünün zorluğundan dolayı- yüksek mertebeli diferansiyel denklemlerde Laplace dönüşümü tercih edilmez (MATLAB ve diğer hesaplama programları sembolik integral işleminde pek başarılı sayılmazlar). Ayrıca nonlineer sistemlerin transfer fonksiyonları elde

edilemediğinden, Laplace dönüşümleri de yapılamaz ama durum uzay teknikleri ile lineer olmayan sistemlerin analizi de yapılabilir.

### 3.3.2. Durum

Dinamik bir sistemin durumu, durum değişkeni olarak adlandırılan değişkenlerden oluşmuş en küçük kümedir, öyle ki sistemin t ≥ $t_0$'daki davranışı, bu değişkenlerin $t = t_0$ anındaki değerleri ve girişin $t \geq t_0$ anı için aldığı değerle birlikte tamamen belirlenir. Durum kavramı asla fiziksel sistemlerle sınırlandırılamaz. Biyolojik ekonomik ve sosyal sistemler gibi sistemlere de uygulanabilir.

### 3.3.3. Durum değişkenleri

Dinamik bir sistemin durumunu belirleyen değişkenlerin en küçük kümesini oluşturan elemanlara, sistemin durum değişkenleri denir. Eğer dinamik sistemin davranışını tamamen belirlemek için $x_1, x_2, \ldots . x_n$ gibi en az *n* tane değişkene ihtiyaç duyuluyorsa (öyle ki bir defaya mahsus $t = t_0$ anındaki başlangıç durumu ve $t \geq t_0$ anındaki giriş değeri verildiğinde, sistemin gelecekteki durumu tamamen belirlenebilsin) o halde bu *n* tane değişken durum değişkenleri kümesini oluşturur.

### 3.3.4. Durum vektörü

Eğer verilen sistemin davranışını tam olarak ifade etmek için *n* tane değişkene ihtiyaç duyuluyorsa, o halde bu *n* tane değişken *n* elemanlı bir x vektörü olarak göz önüne alınabilir. Böyle bu vektör durum vektörü olarak adlandırılır. Durum vektörü bir defaya mahsus $t = t_0$ anındaki başlangıç durumu ve $t \geq t_0$ anındaki $u(t)$ giriş değeri verildiğinde, sistemin herhangi bir $t \geq t_0$ anındaki $x(t)$ durumunu tek başına ifade edebilir.

### 3.3.5. Durum uzayı

Koordinat eksenleri, $x_1, x_2, \ldots . x_n$ eksenlerinden oluşmuş *n* boyutlu uzay, durum uzayı olarak adlandırılır. Herhangi bir durum, durum uzayında bir nokta ile temsil edilebilir.

### 3.3.6. Durum uzayı denklemleri

Durum uzayı analizinde, dinamik sistemlerin modellenmesinde kullanılan üç tip değişkenle ilgileneceğiz: giriş değişkenleri, çıkış değişkenleri ve durum değişkenleri. Verilen bir sistem için durum uzayı gösterimi tek değildir, ayrıca aynı sistemin farklı durum uzayı gösterimleri için durum değişkenlerinin sayısı aynı olmalıdır. $n$. mertebeden bir devrenin durum denklemlerinin genel yapısı, aşağıdaki diferansiyel denklem sistemi gibidir.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = A\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + Bu(t) \tag{3.45}$$

Denklemi kısaca,

$$\frac{d}{dt}(x) = A(x) + Bu(t) \tag{3.46}$$

şeklinde yazılabilir. Burada $x_1, x_2, \ldots . x_n$ terimleri dal kapasite gerilimleri ve kiriş endüktans akımlarıdır. A ve B matrislerinin elemanları devredeki direnç, kapasite ve endüktans gibi elemanların değerlerinin fonksiyonlarıdır. $u(t)$ vektörü ise kaynaklara ilişkin değerleri içerir.

### 3.3.7. Graf teorisi:

Durum denklemlerini elde ederken, graf teorisin ile devre çözme yöntemlerinden yararlanılır. Bir devrenin geometrik yapısını tanımlamak için, devre elemanlarının özelliklerine bakılmaksızın, devre elemanı yerine bir çizgi

parçası konarak elde edilen yapıya devrenin grafı denir. Grafın tüm öğelerini içeren fakat kapalı çevre oluşturmayan grafa devrenin ağacı denir [13].

#### 3.3.7.1. Durum denklemlerinin elde edilmesi:

Durum değişkenlerini elde ederken öncelikle devre üzerinde belirli kurallar doğrultusunda denklem ağacını seçmek gerekiyor. Denklem kurma ağacı aşağıdaki kurallar doğrultusunda seçilir.

- Gerilim kaynakları mutlaka ağaca girecek.
- Akım kaynakları kirişte bırakılacak.
- Mümkün olduğu kadar çok kapasite ağaç içerisine alınmaya çalışılacak.
- Kapasiteler kendi aralarında veya gerilim kaynaklarıyla çevre oluşturmayacak, oluşturacak durumda olanlar mecburen ağacın dışında bırakılacak.
- Mümkün olduğunca çok endüktans kirişte bırakılacak.
- Endüktanslar kendi aralarında veya akım kaynaklarıyla kesitleme oluşturmayacak, oluşturacak durumda olanlar mecburen ağaç içerisine alınacak tüm bu aşamalardan sonra hala ağaç tamamlanmadıysa ağacı tamamlamak üzere direnç elemanları ağaca dâhil edilecek [14].

Bu kurallar doğrultusunda seçilen denklem kurma ağacı uygun ağaç olarak tanımlanır ve kirchoff akım ve gerilim yasalarından yararlanılarak durum denklemleri bulunur.

## 3.4. Durum Denklemlerinin Çözümünde Kullanılan Nümerik İntegral ve Analitik Çözüm Yöntemleri

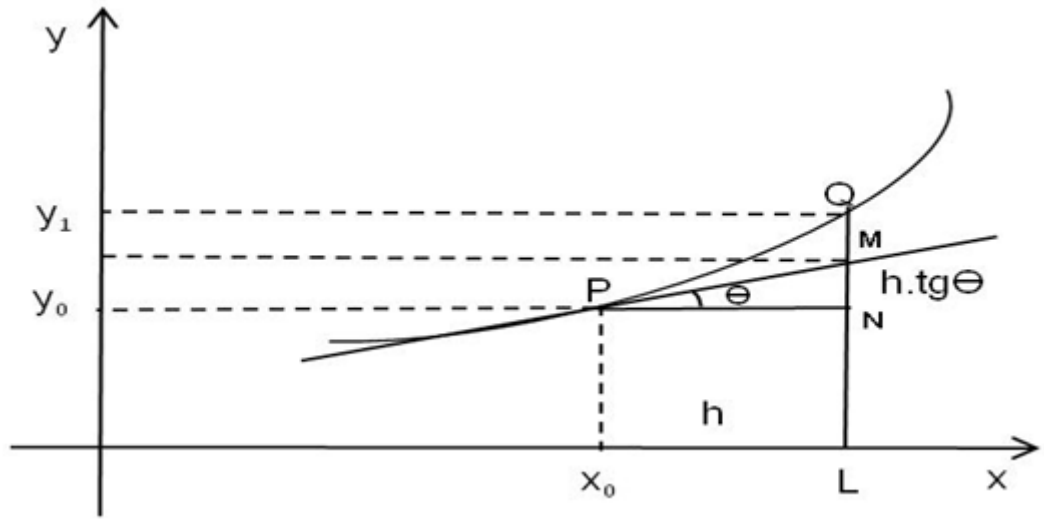
Nümerik analiz (sayısal çözümleme); analitik yöntemlerle çözülemeyen problemleri çözmek için kullanılan yöntemler bütünüdür. Diğer bir tanımla nümerik analiz istenen matematiksel işlemlerin ayrık olarak nasıl hesaplanabileceğinin incelenmesidir. Nümerik analizin amacı, çözümünün elle yapılmasının pratik olmadığı karmaşık, analitik olarak çözümü zor veya olanaksız olan problemlerin çözümlenebilmesi için uygun ve en iyi yaklaşım

veren yöntemleri bulmak, ayrıca bunlardan anlamlı ve faydalı sonuçlar çıkarmaktır.

Günümüzde tüm çabalar algoritmayı elde etmek üzerinde yoğunlaşmıştır. Kullanılabilecek birçok algoritma vardır ve bunların arasında seçim yapmamız gerekir. Bir algoritmayı diğerine tercih etmenin birçok nedeni olabilir, bunlardan en belirgin olanları hız ve doğruluktur. Hızlılık açıkça bir avantajdır, ancak orta boyutlu problemlerde bu avantaj gelişmiş bilgisayarlar vasıtasıyla hemen hemen ortadan kalkmıştır. Daha büyük boyutlu problemler için hız halen önemli bir faktördür ve yavaş bir algoritma pratik olmadığından seçilmeyebilir. Bu çalışmada MATLAB programı kullanılarak hazırlanan algoritmalar hız ve doğruluk açısından da karşılaştırılmıştır. Yavaş olan algoritmalar elenecek, hızlı ve doğru sonuç verenleri tercih edilecektir [15].

### 3.4.1. Euler yöntemi

Euler yöntemi, çözülecek diferansiyel denklemin belirlenen iki noktasının orta noktasını alarak yaklaşık değer alma hesabına dayanır. Euler yöntemi grafiği Şekil 3.10'da gösterilmiştir.




*Şekil 3.10. Euler yöntemi grafiği*

$x_0$ noktasındaki $y(x_0) = y_0$ belli iken $h > 0$ olmak üzere $x_1 = x_0 + h$ noktasındaki fonksiyon değerini bulmak için,

$$y' = f(x, y) \tag{3.47}$$

ifadesinin her iki tarafının $[x_0, x_0 + h]$ aralığında integralini alınarak,

$$\int_{x_o}^{x_o+h} y'\, dx = \int_{x_o}^{x_o+h} f(x, y)dx \tag{3.48}$$

$$y(x_0 + h) - y(x_0) = \int_{x_o}^{x_o+h} f(x, y)dx \tag{3.49}$$

$$y(x_0 + h) = y(x_0) + \int_{x_o}^{x_o+h} f(x, y)dx \tag{3.50}$$

elde edilmiştir. $f(x, y)$ fonksiyonu $x_0 \leq x < x_1$ aralığında yavaş değiştiğinden; $f(x, y)$ değeri yaklaşık olarak $f(x_0, y_0)$ olarak alınmıştır.

$$y(x_0 + h) = y(x_0) + hf(x_0, y_0) \tag{3.51}$$

Denklem 3.51 geometrik olarak ele alınmış ve $(x_0 + h)$ değeri olarak $N$ noktasının ordinatı alınmıştır (Şekil 4.11). Yani,

$$y(x_0 + h) = y_0 + |MN| \tag{3.52}$$

$$= y_0 + h\, tg\emptyset \tag{3.53}$$

$$= y_0 + hy'(x_0) \tag{3.54}$$

$$y'(x_0) = f(x_0, y_0) \tag{3.55}$$

$$y_1 = y_0 + h\, f(x_0, y_0) \tag{3.56}$$

bulunmuştur. Böylece;

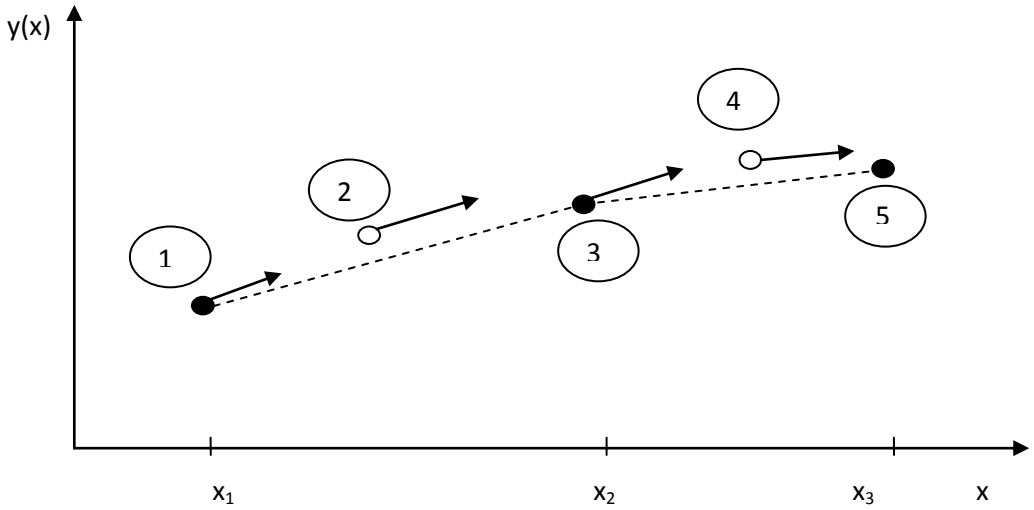
$$y_2 = y_1 + h\, f(x_1, y_1) \tag{3.57}$$

$$y_n = y_n - 1 + hf(x_n - 1, y_n - 1) \tag{3.58}$$

elde edilmiştir [16].

### 3.4.2. Runge-Kutta yöntemi

Runge-Kutta yönteminin Euler yönteminden farkı orta noktaların da değerlerinin alınmasıdır. Runge-Kutta yönteminin grafiği Şekil 3.11'de gösterilmiştir.




*Şekil 3.11. Runge Kutta yöntemi grafiği*

Runge Kutta (2.dereceden) yönteminde ise orta noktalar dikkate alınır ve aşağıdaki denklemler elde edilmiştir. $y' = f(x, y)$ fonksiyonun $t = x_0$ anındaki değeri,

$$k_1 = \frac{dy}{dt} \tag{3.59}$$

$$y(x_0 + h) = y_0 + x_0 h \tag{3.60}$$

olarak elde edilmiştir. $t = x_0 + h$ anında,

$$k_2 = \frac{dy}{dt} \tag{3.61}$$

elde edilmiştir. Buradan denklem 3.62 elde edilmiştir.

$$y(x_0 + h) = y_0 + h(\frac{k_1 + k_2}{2}) \tag{3.62}$$

$$y' = f(t, y) \tag{3.63}$$

$$y(t_0) = y_0 \tag{3.64}$$

Yukarıdaki işlemlerden yararlanarak 4.dereceden Runge Kutta denklemini elde edilmiştir [17].

$$k_1 = hf(t_n, y_n) \tag{3.65}$$

$$k_2 = hf(t_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_1) \tag{3.66}$$

$$k_3 = hf(t_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_2) \tag{3.67}$$

$$k_4 = hf(t_n + h, y_n + k_3) \tag{3.68}$$

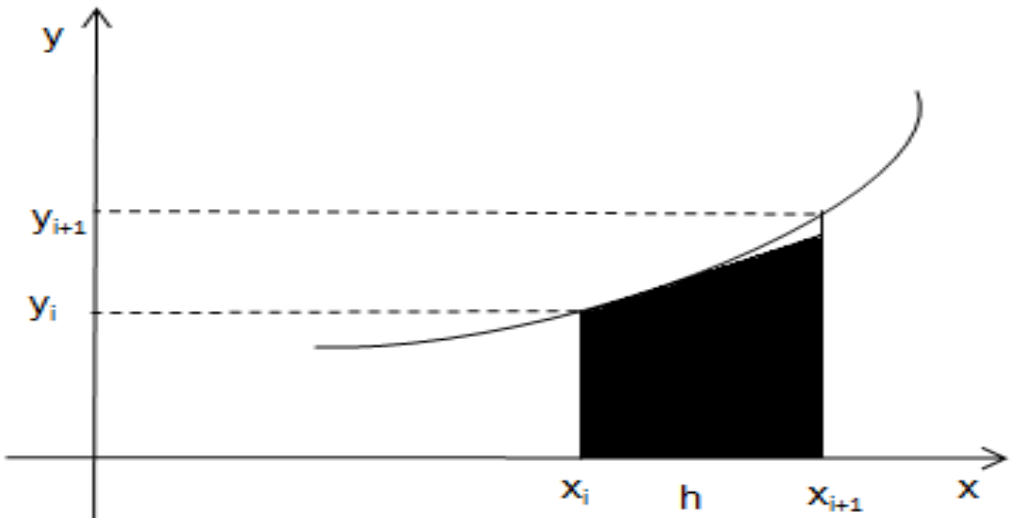
Burada $y_{n+1}$ RK4'ün $y(t_{n+1})$'dir.

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \tag{3.69}$$

$$t_{n+1} = t_n + h \tag{3.70}$$

### 3.4.3.Trapez (yamuk) yöntemi

Temelde, çözülecek diferansiyel denklemi alan hesabı yaparak çözer. Trapez yöntemi grafiği Şekil 3.12'de gösterilmiştir.




*Şekil 3.12.Trapez yöntemi grafiği*

Öncelikle, denklem 3.47'deki ifadenin her iki tarafın $x_i - x_i + h$ aralığında integralı alınmış ve

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} dx = \int_{x_i}^{x_{i+1}} (Ax + Bu)dt) \tag{3.71}$$

elde edilmiştir. Trapez kuralı uygulanınca (taralı bölgenin alanı alındığında),

$$x_{i+1} - x_i = h(Ax_i + Bu_i) + [(Ax_{i+1} + Bu_{i+1}) - (Ax_i + Bu_i)]\frac{h}{2} \tag{3.72}$$

elde edilmiştir. Buradan gerekli işlemler yapılarak denklem 3.73 elde edilmiştir.

$$x_{i+1} = [x_i + h(Ax_i + Bu_i) + [(Ax_{i+1} + Bu_{i+1}) -) - (Ax_i + Bu_i)]\frac{h}{2} \tag{3.73}$$

Denklem 3.73.'deki ifadede benzer terimler aynı tarafa alındığında,

$$x_{i+1}\left(I - A\frac{h}{2}\right) = x_i\left(I + A\frac{h}{2}\right) + (Bu_i + Bu_{i+1})\frac{h}{2} \tag{3.74}$$

$$C = \left(I - A\frac{h}{2}\right) \tag{3.75}$$

$$b_k = x_i\left(I + A\frac{h}{2}\right) + (Bu_i + Bu_{i+1})\frac{h}{2} \tag{3.76}$$

$$x_{i+1} = C^{-1}b_k \tag{3.77}$$

elde edilmiştir [18].

### 3.4.4. Analitik çözüm yöntemi

Denklem 3.46 ifadesini, analitik yöntemle çözmek için Laplace dönüşümünden faydalanılmıştır. Devrede kaynağın olmadığı kabul edilerek,

$$\dot{x} = Ax \tag{3.78}$$

$$x(0^-) = x_0 \tag{3.79}$$

elde edilmiştir. Denklem 3.78'in her iki tarafına Laplace dönüşümü uygulanarak,

$$sx(s) - Ax(s) = x_0 \tag{3.80}$$

$$[sI - A]x(s) = x_0 \tag{3.81}$$

$$x(s) = [sI - A]^{-1}x_0 \tag{3.82}$$

$$\Phi(s) = [sI - A]^{-1} \tag{3.83}$$

elde edilmiştir. Zaman domeninde çözümü bulmak için denklem 3.83'ün her iki tarafına ters Laplace dönüşümü uygulanarak,

$$x(t) = \mathcal{L}^{-1}\{\Phi(s)\}x_0 \tag{3.84}$$

$$x(t) = e^{At}x_0 \tag{3.85}$$

öz çözüm bulunmuştur.

Devrenin zorlanmış çözümünü bulmak için, Laplace dönüşümü kullanılmıştır. Yani, denklem 3.86'daki ifadenin her iki tarafına Laplace dönüşümünü uygulanmış ve

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.86}$$

$$x(0^-) = x_0 \tag{3.87}$$

$$sx(s) - x_0 = Ax(s) + Bu(s) \tag{3.88}$$

$$x_0 = 0 \tag{3.89}$$

$$[sI - A]x(s) = Bu(s) \tag{3.90}$$

$$x(s) = [sI - A]^{-1}Bu(s) \tag{3.91}$$

$$x(s) = \Phi(s)Bu(s) \tag{3.91}$$

elde edilmiştir. Zaman domeninde çözümü bulmak için, denklem 3.91'in her iki tarafına ters Laplace uygulanmış ve

$$x(t) = \mathcal{L}^{-1}\{\Phi(s)Bu(s)\} \tag{3.92}$$

$$x(t) = \int_0^t \Phi(t,\tau)\,B(\tau)d\tau \tag{3.93}$$

zorlanmış çözüm elde edilmiştir.

$$x(s) = \Phi(s)x_0 + \Phi(s)Bu(s) \tag{3.94}$$

$$x(t) = e^{At}x_0 + \int_0^t \Phi(t,\tau)\, B(\tau)d\tau \quad (3.95)$$

Burada öz çözüm ve zorlanmış çözüm aşağıda gösterilmiştir.

Öz çözüm = $Ce^{At}x_0$

Zorlanmış çözüm = $Ce^{At}\int_0^t e^{-At}\, Bu(\tau)d\tau$

### 3.4.4.1. Durum geçiş matrisinin bulunması

Durum geçiş matrisi, $e^{At'}y$i bulurken matris özdeğer ve özvektör kavramlarından faydalanılmıştır. Öncelikle özdeğerler bulunmuştur. A matrisi $A(n,n)$ şeklinde olduğu kabul edilmiş ve

$$Det(\lambda I - A) = 0 \quad (3.96)$$

denkleminin kökleri $(\lambda_i)$ bulunmuştur. Bulunan bu kökler özdeğerlerdir. Bu kökler denklem 3.97 de yerine yazılarak öz vektörler bulunmuştur.

$$(A - \lambda_i I)e_i = 0 \quad (3.97)$$

$$H = [e_1\ e_2\ \ldots\ldots e_n\,] \quad (3.98)$$

$$e^{At} = \Phi(t) = H\begin{bmatrix} exp(\alpha 1 * t) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(\alpha 2 * t) & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & exp(\alpha n * t) \end{bmatrix} H^{-1} \quad (3.99)$$

durum geçiş matrisi $\Phi(t)$ elde edilmiştir. $\Phi(t)$'nin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir [19].

$$\Phi(0) = u(t) \quad (3.100)$$

$$\Phi^{-1}(t) = e^{-At} = \Phi(-t) \quad (3.101)$$

## 3.5. Güç Sistemlerinde Kararlılık

### 3.5.1. Temel kavramlar

Güç sistemlerinin kararlılığı, kısaca güç sistemlerinin normal çalışma koşulları altında mevcut denge konumunu koruması ve bozucu bir etkiye maruz kaldıktan sonra yeniden kabul edilebilir bir denge durumu kazanması olarak tanımlanabilir.

Bir güç sistemindeki kararsızlık, sistem yapısına ve çalışma moduna bağlı olarak farklı şekillerde ortaya çıkabilir. Kararlılık genel olarak senkron çalışmanın korunması olarak tanımlanır. Elektriksel gücün üretiminde güç sistemleri senkron makinelere bağımlı olduğundan, sistemin kararlı çalışmasını sağlamak için gerekli koşul, tüm senkron makinelerin senkronizmada kalmasıdır. Bu kararlılık düşüncesi, generatör rotor açılarına ilişkin dinamikler ve güç –açı bağıntıları ile ifade edilebilir.

Kararlılık hesaplamalarında ele alınan olay, geçici bir bozucu etkiye maruz kalan güç sistemlerinin davranışıdır. Bozucu etki büyük veya küçük olabilir. Yük değişimleri şeklindeki bozucu etkiler sürekli olarak meydana gelir ve sistem değişen koşullara göre kendini ayarlar. Bu koşullar altında sistem sorunsuz çalışabilmeli ve maksimum yükü başarılı bir şekilde besleyebilmelidir. Bir iletim hattındaki kısa devre, büyük generatör veya yüklerin kaybı ya da iki alt sistem arasındaki bağın kaybolması gibi büyük bozucu etkilere de sistem dayanabilmelidir. Rotor açısı kararlılığı, bir güç sisteminde çalışan tüm senkron makinelerin senkronizmada kalma yeteneğidir. İki veya daha fazla senkron makine birlikte çalışırken, tüm makinelerin stator gerilimleri ve akımları aynı frekansa sahip ve her rotorun mekanik hızı bu frekansa uyumlu olmalıdır. Böylelikle birlikte çalışan tüm senkron makineler senkronizmada kalmalıdır. Sürekli hal koşulları altında büyük bir güç sistemindeki her bir makinanın mekanik giriş momenti ile elektriksel çıkış momenti arasında bir denge olup, hız sabit kalır [20].

### 3.5.2. Küçük işaret veya sürekli hal kararlılığı

Küçük işaret kararlılığı, küçük bozucularla karşılaşıldığında sistemin senkronizmayı sürdürme yeteneğidir. Küçük bir bozucu olduğunda, sistemin cevabını belirlemek için sistem doğrusallaştırılabilir. Kararsızlık iki şekilde oluşabilir.

- Senkronizma momentinin eksikliğinden yüzünden generatör rotor açısındaki sürekli artış
- Yetersiz sönüm momenti eksikliğinden dolayı, rotor salınımlarının artan genliği

### 3.5.3.Geçici hal kararlılığı

Faz-toprak, faz-faz-toprak ve üç faz kısa devresi gibi şiddetli bir bozucu etkiye maruz kaldığında güç sisteminin senkronizmayı koruyabilmesidir. Geçici hal kararlılık incelemelerinde inceleme süresi, küçük sistemlerde 3-5 saniye ile sınırlı olmakla beraber, çok büyük sistemler için yaklaşık $10\,sn$ kadar bu süre uzayabilmektedir.

### 3.5.4.Dinamik hal kararlılığı

Birkaç saniyelik geçici olay süresinden sonra mekanik regülâtörlerin de devrede olduğu birkaç dakikalık sürede sistemin bozucu etkiye verdiği cevaptır.

### 3.5.5. Denge noktası

Durum denklemleri ile ilgilenirken bilmemiz gereken önemli kavramlardan bir tanesi denge noktası tanımıdır. Lineer zamanla değişmeyen ve

$$\dot{x} = f\{x_0\} = 0 \tag{3.102}$$

denge noktası bu eşitliği sağlamalıdır [21]. Yukarıdaki (3.102) bağıntısıyla ifade edilen bir sistemin denge noktaları $f(x) = 0$ eşitliğinin reel kökleridir. Denge noktası ayrık olmalıdır. Yani denge noktası civarında başka denge noktaları bulunmamalıdır.

### 3.5.6.Durum denklemleri yöntemi ile güç sistemlerinin kararlılık analizi

Denklem 3.46'ya ait özdeğerler ve özvektörler sırasıyla; denklem 3.96 ve denklem 3.97 de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Devrenin öz ve zorlanmış çözümleri de, denklem 3.95'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Elde edilen bu denklemler, denklem yeniden düzenlendiğinde,

$$x(t) = e^{At}x_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau \tag{3.103}$$

$$x(0) = x_0 \tag{3.104}$$

elde edilmiştir. Bu ifadede ilk terim, öz çözüm olur. Devredeki kaynak fonksiyonu nedeniyle ortaya çıkan ikinci terim ise devrenin zorlanmış çözümü adını alır.

Başka bir yöntemle bu diferansiyel denklem takımı şu şekilde de çözülebilir. Homojen kısmın çözümü ile diferansiyel denklemin bir $x_{ö}(t)$ özel çözümünün toplamı tam çözümü vermektedir.

$$x_{tam}(t) = x_h(t) + x_{ö}(t) \tag{3.105}$$

$$x_{tam}(t) = x_h(t) + x_{ö}(t) = Ce^{At} + x_{ö}(t) = [x_0 - x_{ö}(0)]e^{At} + x_{ö}(t) \tag{3.106}$$

$$x_{tam}(t) = x_0e^{At} + x_{ö}(t) - x_{ö}(0)e^{At} \tag{3.107}$$

Denklem 3.107 deki ifadede ilk terim öz çözüm; ikinci terim zorlanmış çözümdür. Lineer zamanla değişmeyen devrelerde $e^{At}$ matrisi, $\Phi(t)$ durum geçiş matrisine karşı düşer. $e^{At}$ matrisinin özdeğerlerine göre devre kararlı, asimptotik kararlı veya karasız olur. $t \to \infty$ durumunda devre;

$$x(t) = \left\{ \begin{array}{cc} x_{ö}(t) & reel(\lambda_i) < 0 \\ x_{ö}(t) + K_1\cos(w_1t) + K_2\sin(w_1t) & reel(\lambda_i) = 0 \\ \infty & reel(\lambda_i) = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} asimptotik\ kararlı \\ kararlı \\ karars\imath z \end{array} \tag{3.108}$$

olur.

Sistemlerin denge noktası; hangi noktada başlatılırsa başlatılsın, sistemin gidip sabit kaldığı noktadır. Bu denge noktası zamanla değişmeyen lineer sistemlerde bir tane olur. Bu çalışmada denge noktası sıfır olarak

alınmıştır. Sistem bu noktanın dışında başka bir noktada çalıştırmaya başlatıldığında sistem bu noktaya yöneliyorsa sisteme kararlıdır denir. Eğer direkt denge noktasına ulaşıyorsa asimptotik kararlı ulaşamasa bile belirli bir sınırın içinde kalıyorsa bu sisteme de Lyapunov kararlı denir.

### 3.6. Güç Sistemlerinin Geçici Rejim Analizi

Sistemlerin bir giriş uyarısına karşı gösterdikleri tepkidir. Bu tepki incelenirken; cevap hızının sistemin hangi temel parametrelerine bağlı oldukları da belirlenmiş olur. Bu inceleme sonucu uygun bir davranışa sahip olmayan güç sistemlerinden daha iyi bir davranış elde etmek için neler yapılabileceği ortaya çıkar. Analiz problemlerinde sistemlere referans giriş işaretleri uygulanır ve bu işaretlere verilen yanıtlar incelenerek sistemlerin davranışı değerlendirilmeye çalışılır. Bir kontrol sisteminde eğer çıkış işareti giriş işaretini belirli koşullar altında takip etmesi isteniyorsa, giriş ve çıkış işaretleri zaman fonksiyonu olarak karşılaştırılır. Bu nedenle kontrol sistemlerinde sistem davranışının son değerlendirilmesi genellikle zaman alanında yapılır. Bir kontrol sisteminin zaman yanıtı genellikle iki kısımdan oluşur. Bunlar geçici hal yanıtı ve sürekli hal yanıtlarıdır. Eğer $y(t)$ bir sürekli sistem yanıtını ifade ediyorsa, $y_t(t)$geçici yanıtı ve $y_{ss}(t)$ sürekli yanıtı ifade etmek üzere, genelde

$$y(t) = y_t(t) + y_{ss}(t) \tag{3.109}$$

şeklinde yazılabilir. Kontrol sistemlerinde geçici hal yanıtı, zaman yanıtının, zaman ilerledikçe sıfıra doğru giden kısmı olarak tanımlanır. buna göre $y_t(t)$

$$\lim_{t\to\infty} y_t(t) = 0 \tag{3.110}$$

özelliğini sağlar. Sürekli hal yanıtı ise, geçici hal yanıtı söndükten sonra, zaman yanıtının geriye kalan kısmıdır. denklem 3.114 kullanılarak,

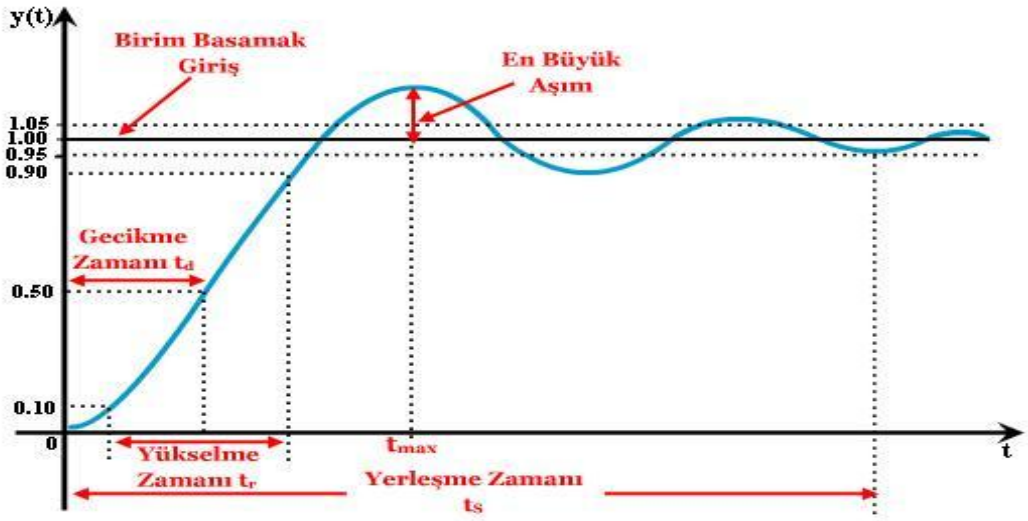
$$y_t(t) = [x_0 - x_{\dot{0}}(0)]e^{At} \tag{3.111}$$

geçici rejim yanıtı elde edilir. Sürekli hal yanıtı ise denklem 3.112 gibi elde edilir.

$$y_{ss}(t) = x_{\ddot{o}}(t) \tag{3.112}$$

Sistem karakteristiklerinin incelenmesi amacı ile test sinyallerinden hangisinin veya hangilerinin kullanılacağı sistemin normal çalışma koşulu altında, çoğunlukla maruz kaldığı giriş uyarısının biçimine göre belirlenir. Buna göre eğer denetim sistemi normal çalışma koşulları altında başvuru giriş veya bozucu giriş uyarısı olarak zamana bağlı giderek doğrusal artan bir sinyale maruz kalıyorsa test sinyali olarak, rampa fonksiyonu kullanılması uygun olur. Benzer şekilde eğer sistem ani olarak belli bir değere kadar artan bir uyarıya maruz kalıyorsa, basamak test sinyali, buna karşılık sistem anlık olarak şok uyarısına maruz kalıyorsa ani darbe test sinyali kullanılır. Bir denetim sistemini test sinyallerine göre inceledikten ve bu sinyallere göre tasarladıktan sonra sistemin gerçek giriş sinyallerine göre davranışı yaklaşık olarak belirlenmiş olur. Bu tür test sinyallerini kullanmak suretiyle aynı esasa dayanan tüm sistemlerin dinamik davranışlarını mukayese etme imkânı sağlanmış olur.

Doğrusal kontrol sistemlerinde geçici hal yanıtının değerlendirilmesi genellikle $u(t)$ birim basamak yanıtından yararlanılarak yapılır. Bu yüzden girişe basamak test sinyali uygulanır. Kontrol sisteminin birim basamak girişe cevabı birim basamak yanıtı olarak adlandırılır. Şekil 3.13'de doğrusal bir kontrol sisteminin örneksel birim basamak yanıtı görülmektedir.




*Şekil 3.13. Birim basamak cevabı*

Güç sistemlerinde geçici rejim analizi yapılırken özdeğerlerden yararlanılır. Sönüm oranına göre $RLC$ devresinin üç farklı davranışı söz konusudur. Özdeğer $\lambda = a + jb$ şeklinde ifade edilirse, ikinci dereceden diferansiyel denkleme sahip bir sistemin farklı sönüm durumları aşağıda özetlenmiştir.

• Aşırı Sönümlü Durum: Köklerin reel ve birbirinden farklı olması durumunda gerçekleşen durumdur. Bu durum da kökler yalnızca reel bileşen içerirler. Dolayısıyla karekteristik denklemin diskriminantı sıfıra eşittir. Bu durumda kökler,

$\lambda_1 = a_1$ , $\lambda_2 = a_2$ ; ; sönüm oranı $\xi > 1$ olur.

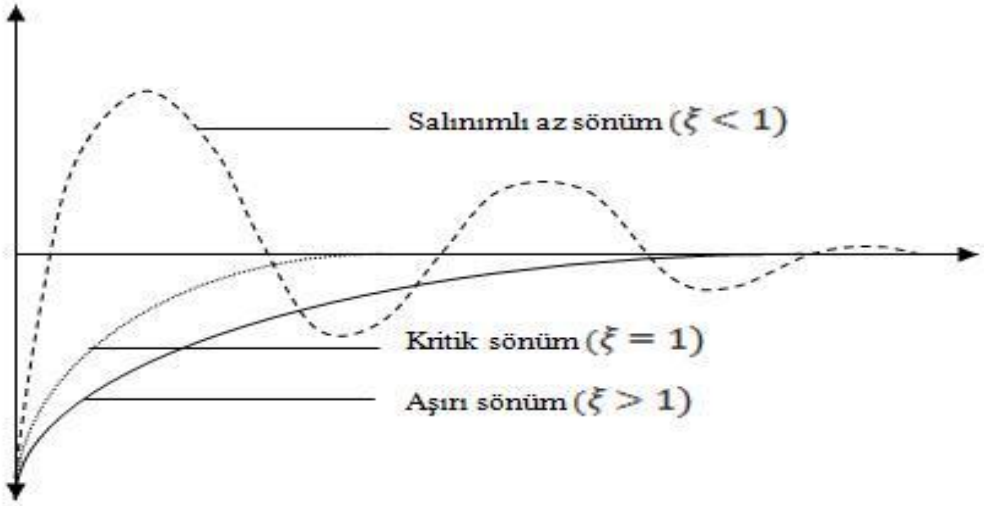
• Kritik Sönümlü Durum: Köklerin reel ve birbirine eşit olduğu durumdur. Bu durumda kökler,

$\lambda_1 = \lambda_2 = a1$ ; ve sönüm oran $\xi = 1$ olur.

• Az Sönümlü Durum: Köklerin karmaşık olduğu durumdur. Bu durumda,

$\lambda_1 = a + jb$ , $\lambda_2 = a + jb$ ;sönüm oranı $\xi < 1$ olur.

Şekil 3.14'de bu sönümler görülebilir.




*Şekil 3.14. Dalga sönüm şekilleri*

## 3.7. Güç Sistemleri Analizinde Kullanılan Bilgisayar Programları

### 3.7.1. MATLAB programı

• MATLAB programı (Matrix Laboratory) ilk defa 1985'de C.B Moler tarafından matematik ve özellikle de matris esaslı matematik ortamında kullanılmak üzere geliştirilmiş etkileşimli bir paket programlama dilidir. MATLAB mühendislik alanında (hesaplamalarında) sayısal hesaplama, veri çözümleri ve grafik işlemlerinde kullanılabilecek genel amaçlı bir program olmakla beraber özel amaçlı modüler paketlere de sahiptir. CONTROL TOOLBOX, SIGNAL TOOLBOX gibi paket programlar CACSD (Bilgisayar destekli denetim sistemi tasarımı) paketler olup bunlar denetim sistemlerinin tasarımında çok etkili araçlardır [22]. Ayrıca WINDOWS ortamında çalışan SIMULINK, etkileşimli benzetim programlarının hazırlanması ve çalıştırılmasında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Programın kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır;

• Denklem takımlarının çözümü, doğrusal ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerinin çözümü, integral hesabı gibi sayısal hesaplamalar.

• Veri çözümleme işlemleri.

• İstatistiksel hesaplamalar ve çözümlemeler.

• Grafik çizimi ve çözümlemeler.

• Bilgisayar destekli denetim sistemi tasarımı.

### 3.7.2. EMTP-ATP programı

EMTP-ATP programı güç sistemlerinin analizinde yaygın olarak kullanılan bir programdır. EMTP- ATP geçici olayların sayısal benzetim için kullanılan evrensel bir program sistemidir. Bu dijital program ile karmaşık ağlar ve keyfi yapı kontrol sistemleri simüle edilebilir. EMTP- ATP geniş modelleme yetenekleri ve geçici durum analizi dışında ek önemli özelliklere sahiptir. EMTP-ATP yıldırım dalga analizi, yalıtım ve mil burulma salınım çalışmaları geçiş için kullanılan, koruyucu röle modelleme, harmonik ve güç kalite çalışmaları gibi alanlarda kullanılmaktadır [23].

# 4. UYGULAMALAR VE SONUÇ

## 4.1.Uygulamalara Giriş

Bu tezde yapılan uygulamalarda, $300\ km$ uzunluğundaki bir iletim hattının farklı yük ve farklı giriş sinyali durumlarında analizi yapılmıştır.

Giriş sinyali olarak sabit bir $u(t)$ gerilimi uygulanarak; hat sonu açık devre, hat sonu omik yük, hat sonu kapasitif yük ve hat sonu endüktif yük durumlarında iletim hattında meydana gelen geçici rejim olayları analiz edilmiştir.

Giriş sinyali olarak sinüzoidal bir $u(t)$ gerilimi uygulanarak; hat sonu açık devre durumunda iletim hattında meydana gelen geçici rejim olayları incelenmiştir. Bütün uygulamalarda iletim hattı π modeli baz alınmıştır.

### Uygulama 4.1

Giriş gerilimi $u(t)$ ve hat sonu açık devre olan 300 $km$ uzunluğundaki bir iletim hattının (Şekil 4.6), tahmini hat parametreleri (477 MCM iletkeni için) ve giriş gerilimi;

$u(t) = 1000\ V$
$r = 0.2\ \Omega/km$
$l = 1.37\ mH/km$
$c = 8.37\ nF/km$

şeklindedir. Bu uygulamada yukarıda özellikleri verilen iletim hattı, üç farklı kombinasyonda analiz edilmiştir. Yani iletim hattı π modeli kullanılarak toplu parametreli devre sayısı sırasıyla, $n = 5$, $n = 10$ ve $n = 20$ olan iletim hattı, durum uzay teknikleri kullanılarak, hat sonu gerilimi ve kaynak akımı geçici rejim cevapları elde edilmiş ve sistemin kararlılığı incelenmiştir.

**Çözüm 4.1**

Bu uygulamada; hat sonu açık devre olan bir enerji iletim hattına enerji verilmesi sırasında meydana gelen aşırı gerilim ile aşırı akım dalgalarının iletim hattı izolasyonu ve koruyucu teçhizat üzerindeki etkisini incelemek, ayrıca nümerik integral ile analitik çözüm yöntemlerinden elde edilen sonuçların doğruluğunu ispatlanması amaçlanmıştır. Öncelikle, toplu parametreli devre sayısı $n = 5,\ n = 10$ ve $n = 20$ için hat parametreleri, Çizelge 4.1' de gösterilmiştir.

*Çizelge 4.1. Uygulama 4.1'e ait hat parametreleri*

| $n = 5$ | $n = 10$ | $n = 20$ |
|---|---|---|
| $R = 0.2 * 60 = 12\ \Omega$ | $R = 0.2 * 30 = 6\ \Omega$ | $R = 0.2 * 15 = 3\ \Omega$ |
| $L = 1.37 * 60 = 82{,}2\ mH$ | $L = 1.37 * 30 = 41{,}1\ mH$ | $L = 1.37 * 15 = 20.5\ mH$ |
| $C = 8.37 * 50 = 50{,}04\ nF$ | $C = 8.37 * 30 = 25{,}02\ nF$ | $C = 8.37 * 15 = 12{,}51\ nF$ |

Çizelge 4.1' de verilen hat parametreleri, denklem 3.7'de yerlerine yazılarak, iletim hattının karakteristik empedansı yaklaşık (iletim hattı π modeli için $l = 1.37mH/km, r = 0.2\Omega/km, C = 16.74nF/km$ parametreleri kullanılmıştır),

$$z_0 = \sqrt{\frac{\mathrm{R+jwL}}{\mathrm{jwC}}} \approx 300\ \Omega$$

olarak bulunur. İletim hattı üzerinde ilerleyen gerilim dalgası d uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna $\tau$ süresinde ulaşır. $300\ km$ uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna gerilim dalgasının varma süresi (gecikme süresi),

$$\tau = d\sqrt{LC} = 1.4\ ms$$

olarak elde edilmiştir. Geçici hal esnasında kaynak akımı yaklaşık,

$$I_s = \frac{U_0}{Z_0} \approx 3.33\ \mathrm{A}$$

olarak elde edilmiştir. Denklem 3.17'den gerilim yansıma katsayısı +1 olarak elde edilmiştir. Bu durumda $\tau$ süresi sonunda hattın sonuna oluşan gerilim dalgasının tamamı geri yansıyacaktır. Yani hat sonu gerilimi (Kayıpsız hat için),

$$V_r = 2U_0 = 2000\,V$$

olarak bulunmuştur. Kayıpsız bir hatta $2\tau$ süresinden sonra hattın her yerinde gerilim $2U_0$ olur. Fakat bu uygulamada, hattın seri direnci ihmal edilmediğinden hat üzerinde yürüyen dalganın gerilimi düşecektir. Gerilim dalgasının hat sonuna varma süresinde, yani $t = 1.4\,ms$ esnasındaki değeri, denklem 3.43 kullanılarak,

$$u_i = U_0 e^{-\left(\frac{R}{2Z}\right)vt} = U_0 e^{-t/T} \approx 903\,V$$

olarak elde edilmiştir. Bu gerilim dalgasının tamamı yansıyacağından hat sonu gerilimi,

$$V_r = 2u_i = 1806\,V$$

olarak bulunmuştur.

Uygulama 4.1'e ait durum denklemleri aşağıdaki gibidir [24].

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ i_n \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & . & . & . & . & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} & . & . & . & . & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & . & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} & . & . & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & 0 \\ 0 & \dots & & & & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \dots & & & & & 0 & \frac{2}{C} & -\frac{2G}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ i_n \\ v_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \qquad (4.1)$$

MATLAB programını kullanılarak bu uygulamanın geçici hal analizi yapılmıştır. Öncelikle, her farklı '$n$' değeri için denklem 4.1 ifadesi, MATLAB programı kullanılarak hazırlanan algoritmayla (Ek.1), sayısal ortamda

kullanılmak üzere elde edilmiştir. Elde edilen durum denklemlerini yine MATLAB programı kullanılarak algoritmaları yazılan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle çözülerek, sistemin geçici rejim cevabı ve kararlılığı incelenmiştir.

Bu uygulamada nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleri için adım aralığı $h = 0.000001$ ve zaman aralığı $t = 0 - 0.0043\,sn$ olarak alınmıştır. Sırasıyla Euler, Runge Kutta, Trapez, analitik çözüm yöntemleri ve EMTP-ATP programıyla elde edilen kaynak akımı ve hat sonu gerilimleri (her üç farklı '$n$' için ayrı ayrı olacak biçimde) elde edilerek grafikler üzerinden gösterilmiştir. Euler yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresinin, yansıma katsayısının ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\,ms$

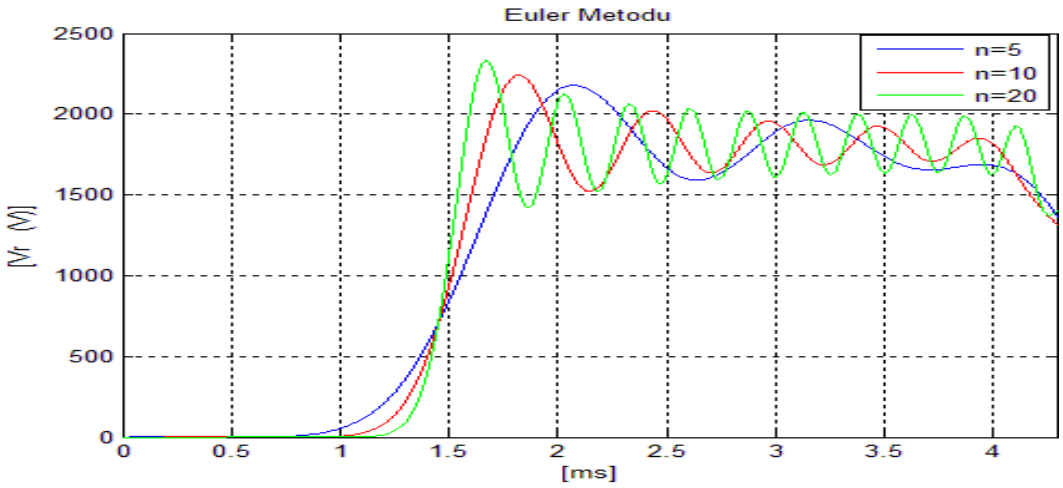
$\Gamma = +1$

$V_r \approx 1800\,V$

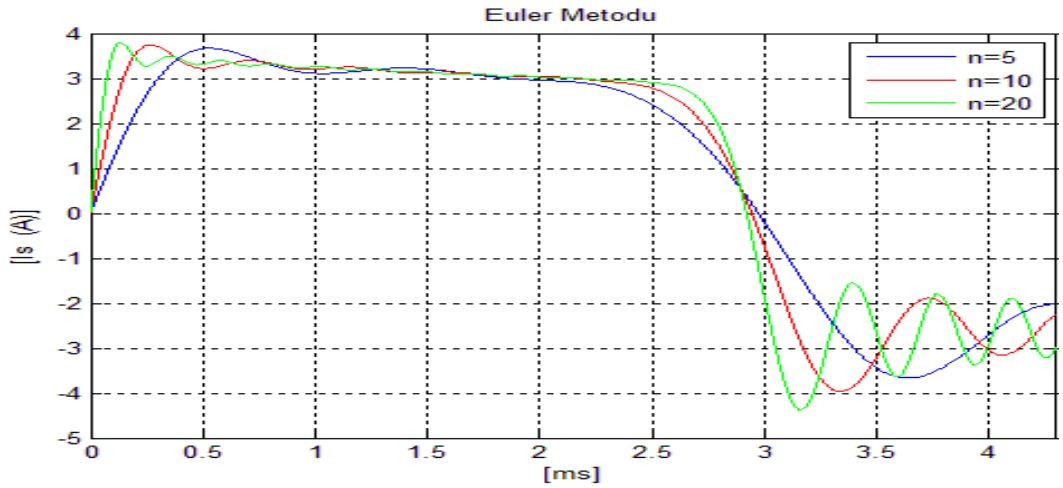
olduğu görülmektedir. İletim hattının bölüm sayısının artması, bölüm parametrelerinin düşmesine sebep olmuş, bundan dolayı hat sonu gerilimin de salınımların attığı şekilden gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.2 incelendiğinde; kaynaktan akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\,\mathrm{A}$

olduğu görülmektedir. Ayrıca enerji iletim hattının bölüm sayısının artması, kaynak akımında dalgalanmaya sebep olduğu şekilde gözlemlenebilmektedir.




*Şekil 4.1. Uygulama 4.1 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.2. Uygulama 4.1 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Runge Kutta yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresinin, yansıma katsayısının ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

$\Gamma\ = +1$

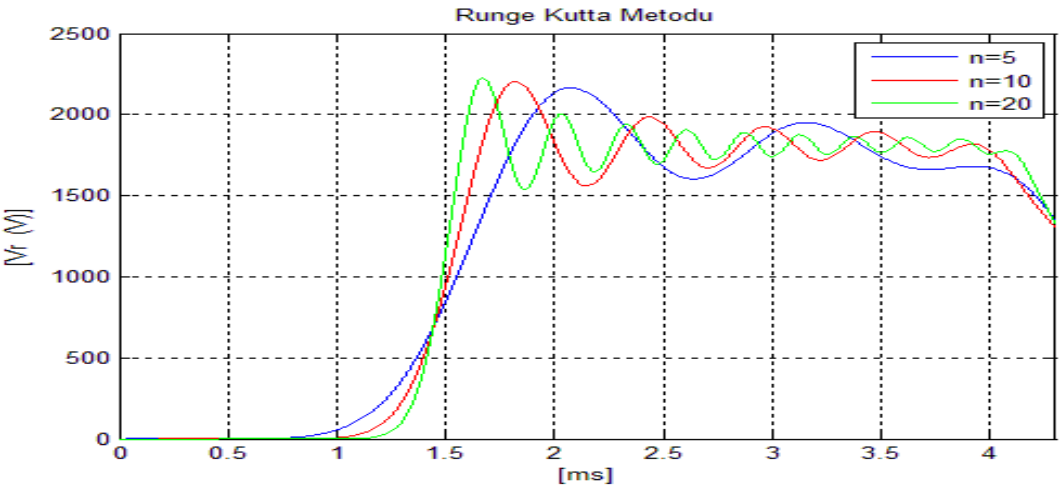
$V_r \approx 1800\ V$

olduğu görülmektedir. İletim hattının bölüm sayısının artması, bölüm parametrelerinin düşmesine sebep olmuş, bundan dolayı hat sonu gerilimin de

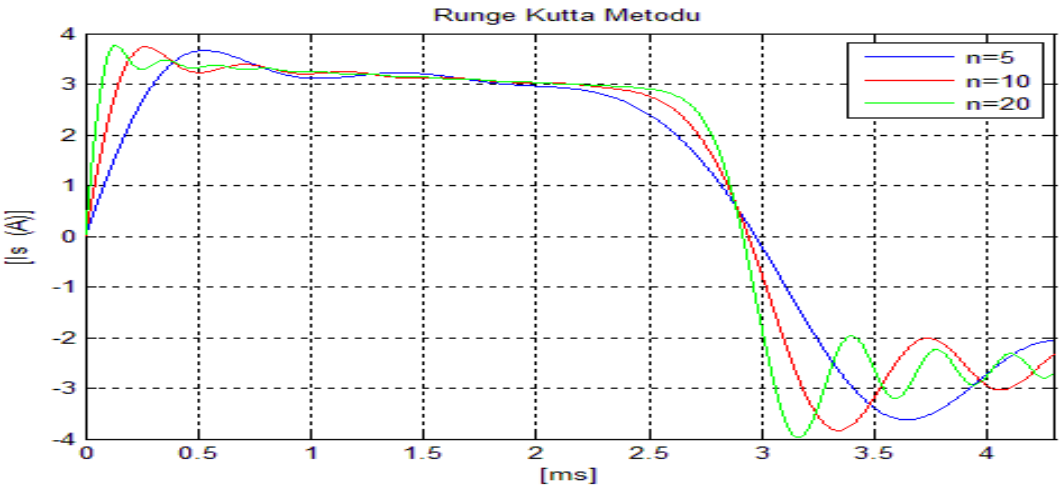
salınımların attığı şekilden gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.4 incelendiğinde; kaynaktan akımının yaklaşık,

$$I_s \approx 3.33 \text{ A}$$

olduğu görülmektedir. Ayrıca enerji iletim hattının bölüm sayısının artması, kaynak akımında dalgalanmaya sebep olduğu şekilde gözlemlenebilmektedir.




*Şekil 4.3. Uygulama 4.1 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.4. Uygulama 4.1 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Trapez yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresinin, yansıma katsayısının ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\, ms$

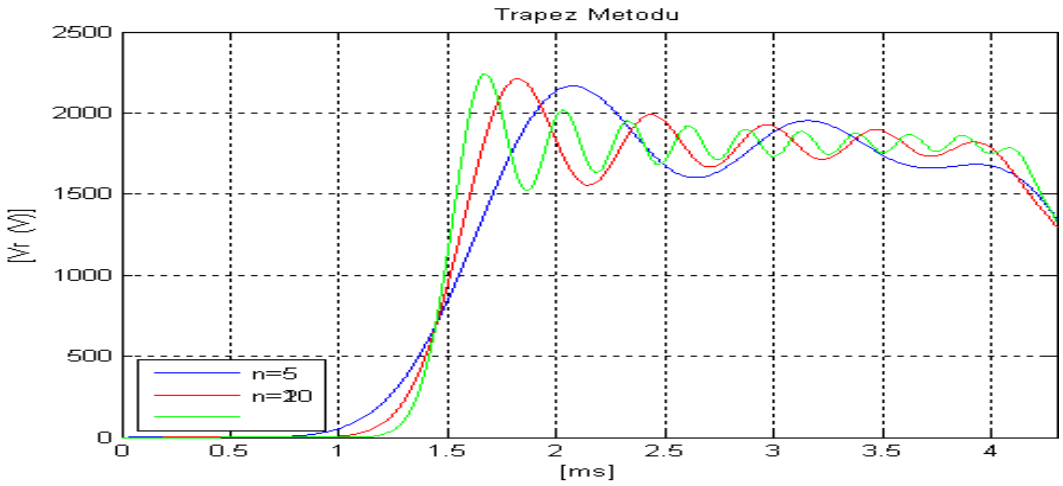
$\Gamma = +1$

$V_r \approx 1800\, V$

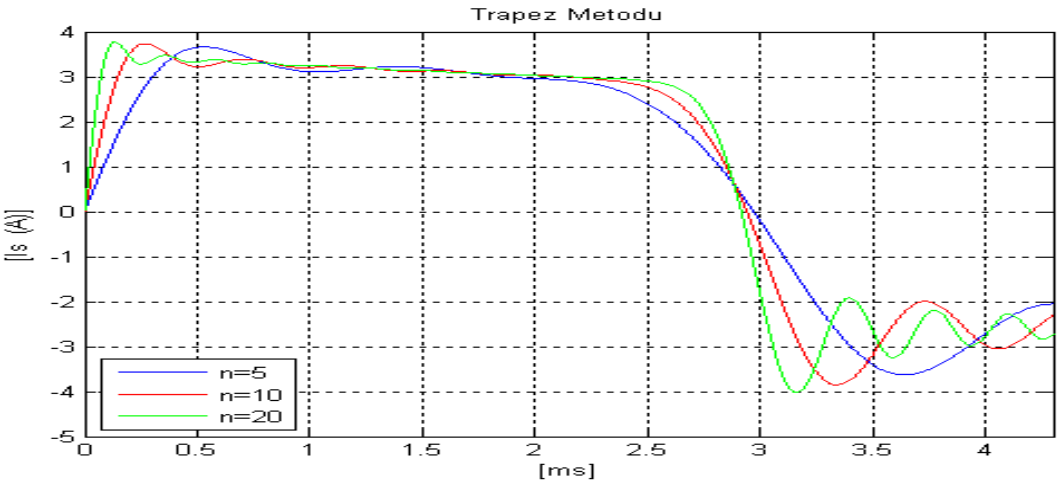
olduğu görülmektedir. İletim hattının bölüm sayısının artması, bölüm parametrelerinin düşmesine sebep olmuş, bundan dolayı hat sonu gerilimin de salınımların attığı şekilden gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.6 incelendiğinde; kaynaktan akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir. Ayrıca enerji iletim hattının bölüm sayısının artması, kaynak akımında dalgalanmaya sebep olduğu şekilde gözlemlenebilmektedir.




*Şekil 4.5. Uygulama 4.1 için Trapez yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.6. Uygulama 4.1 için Trapez yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Analitik çözüm yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekil 4.7 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresinin, yansıma katsayısının ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\, ms$

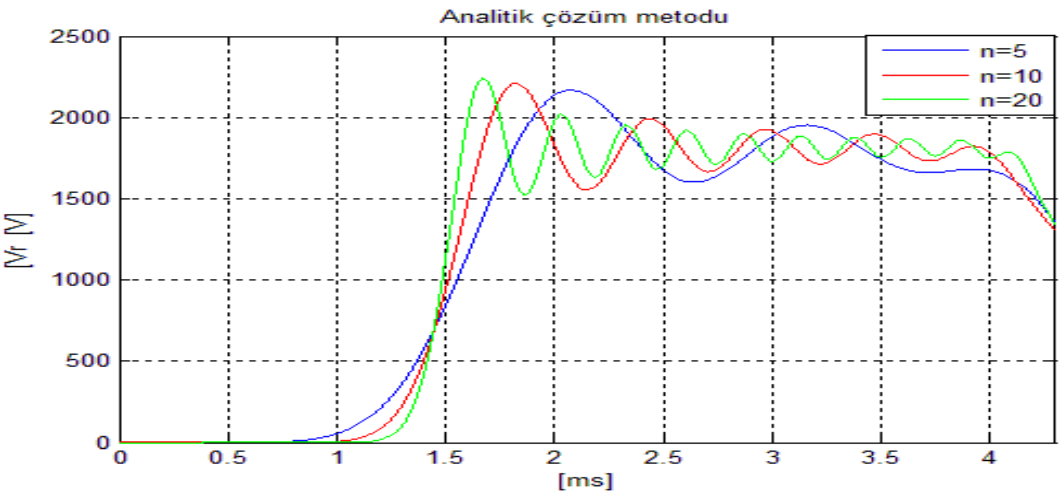
$\Gamma = +1$

$V_r \approx 1800\, V$

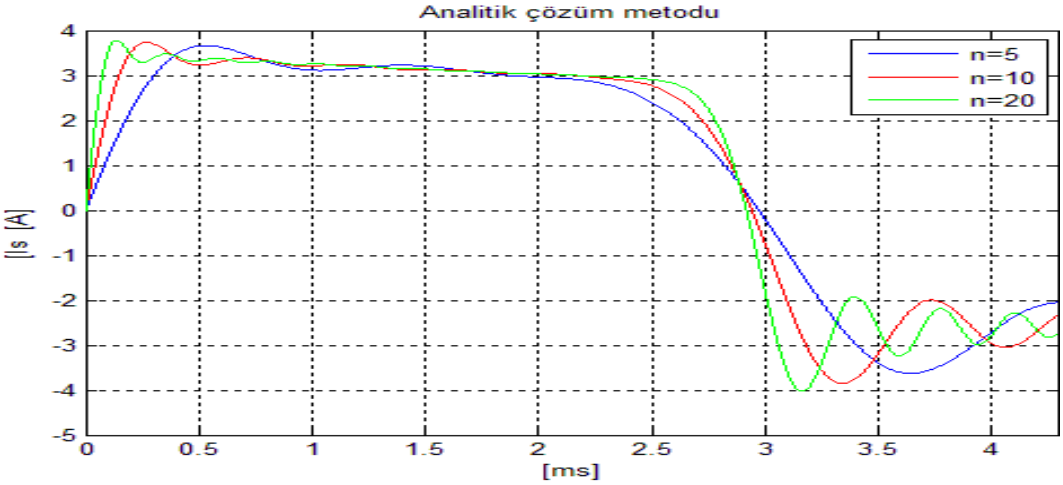
olduğu görülmektedir. İletim hattının bölüm sayısının artması, bölüm parametrelerinin düşmesine sebep olmuş, bundan dolayı hat sonu gerilimin de salınımların attığı şekilden gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.8 incelendiğinde; kaynaktan akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir. Ayrıca enerji iletim hattının bölüm sayısının artması, kaynak akımında dalgalanmaya sebep olduğu şekilde gözlemlenebilmektedir.




*Şekil 4.7. Uygulama 4.1 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.8. Uygulama 4.1 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

EMTP-ATP programı ile elde edilen grafikler, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresinin, yansıma katsayısının ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\, ms$

$\Gamma = +1$

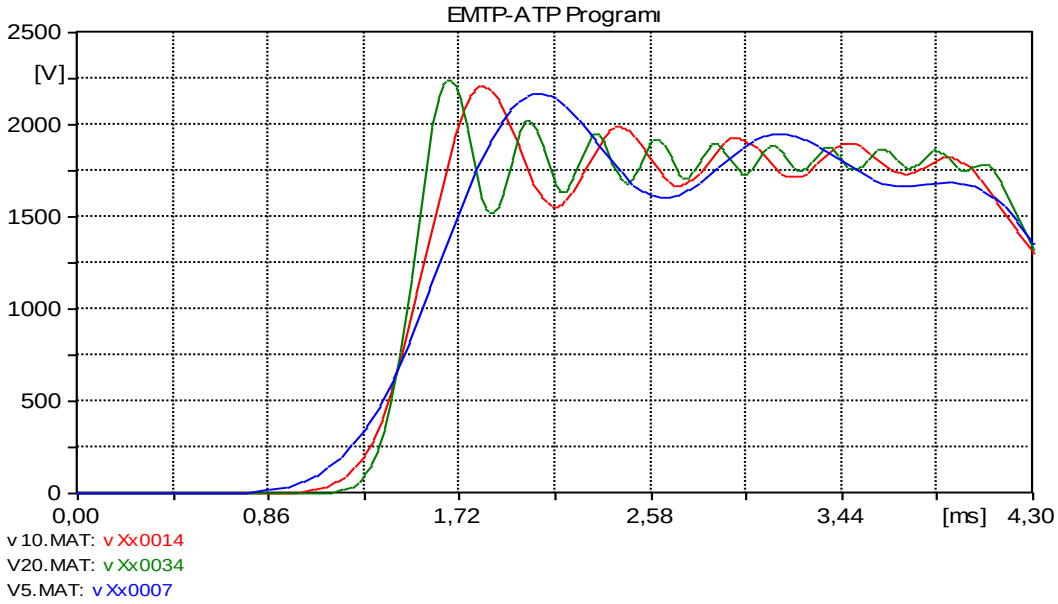
$V_r \approx 1800\, V$

olduğu görülmektedir. İletim hattının bölüm sayısının artması, bölüm parametrelerinin düşmesine sebep olmuş, bundan dolayı hat sonu gerilimin de

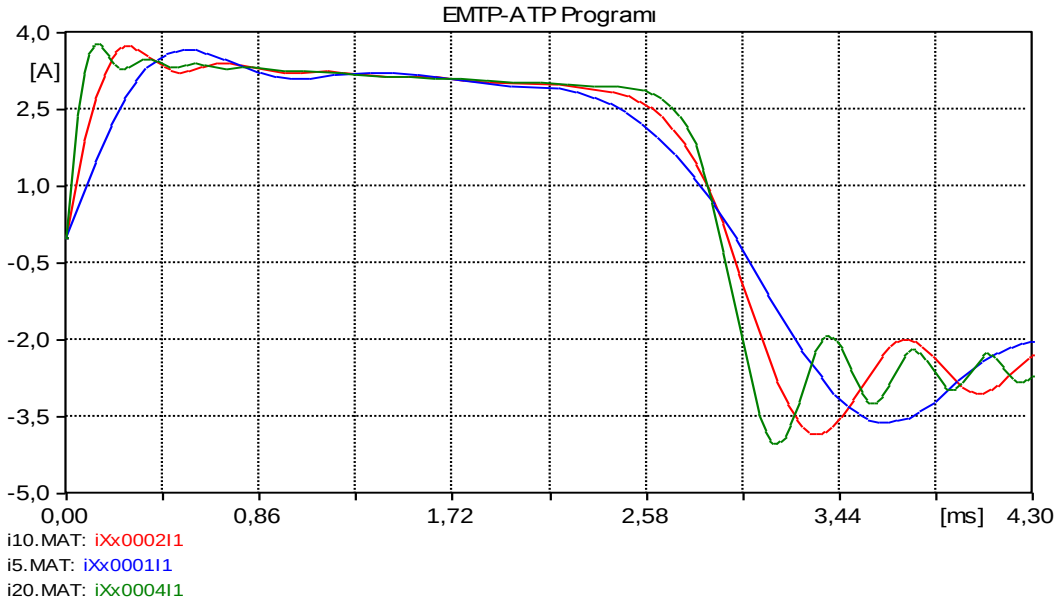
salınımların attığı şekilden gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.10 incelendiğinde; kaynaktan akımının yaklaşık,

$$I_s \approx 3.33\ \text{A}$$

olduğu görülmektedir. Ayrıca enerji iletim hattının bölüm sayısının artması, kaynak akımında dalgalanmaya sebep olduğu şekilde gözlemlenebilmektedir.

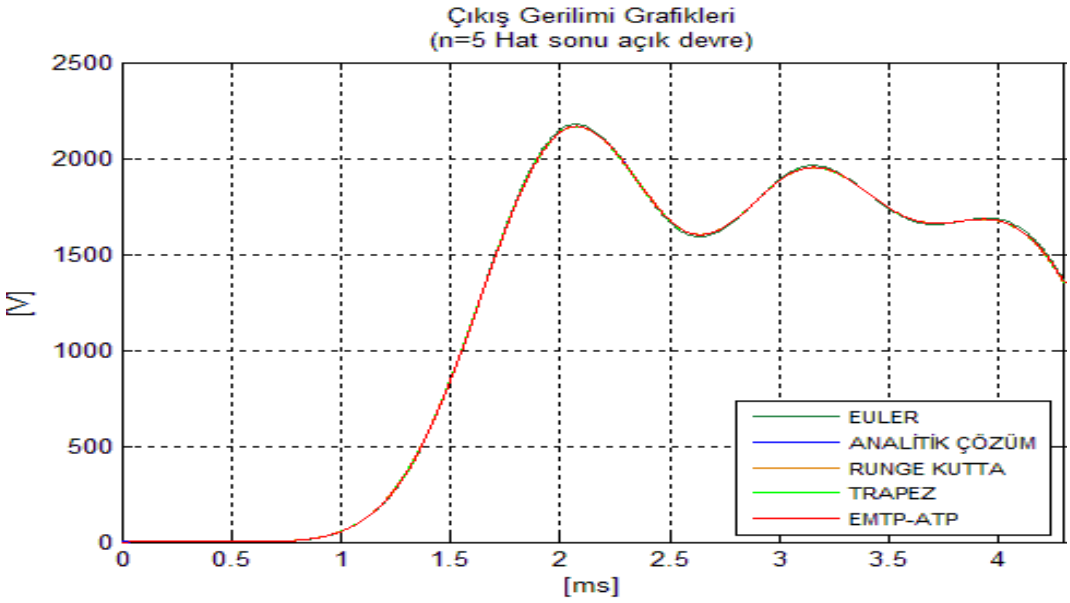



*Şekil 4.9. Uygulama 4.1 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilimi*

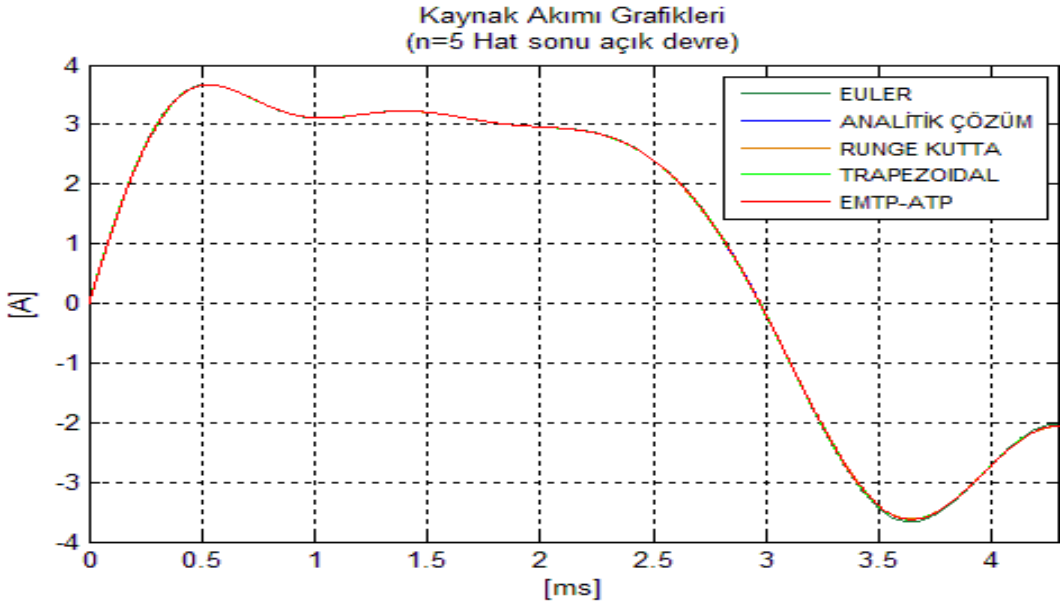



*Şekil 4.10. Uygulama 4.1 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı*

Nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle elde edilen sonuçların doğruluğunu göstermek için akım ve gerilim grafikleri, EMTP-ATP programı ile elde edilen sonuçla karşılaştırılmıştır. $n = 5$ için nümerik integral yöntemleri, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP programından elde edilen hat sonu gerilim ve kaynak akımı grafikleri, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 incelendiğinde; Euler yönteminin diğer yöntemlerden biraz saptığı görülmektedir.

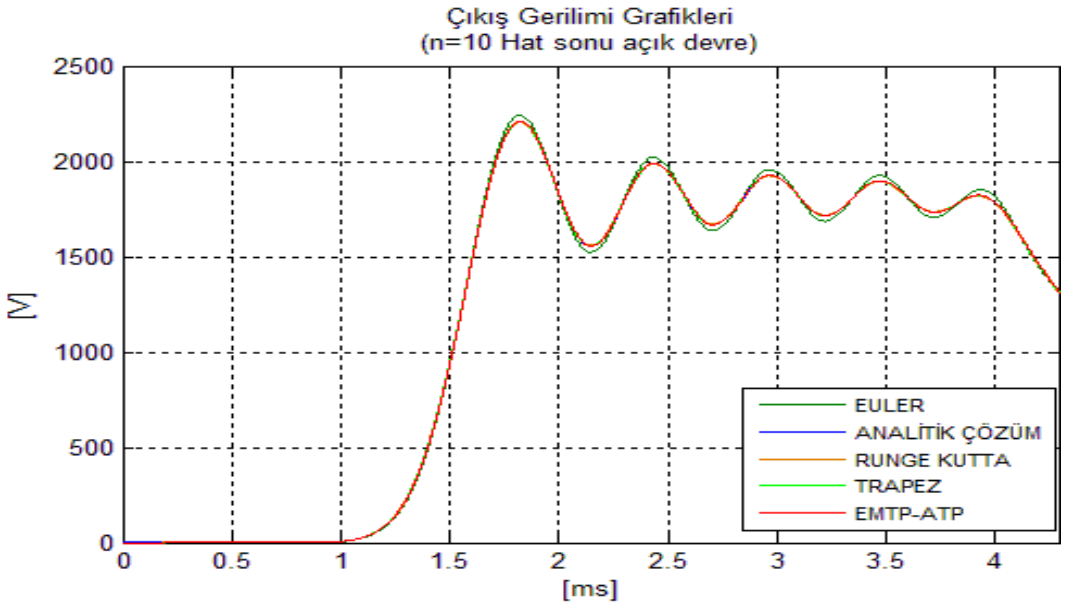



*Şekil 4.11. Uygulama 4.1'e ait n=5 için hat sonu gerilimi*

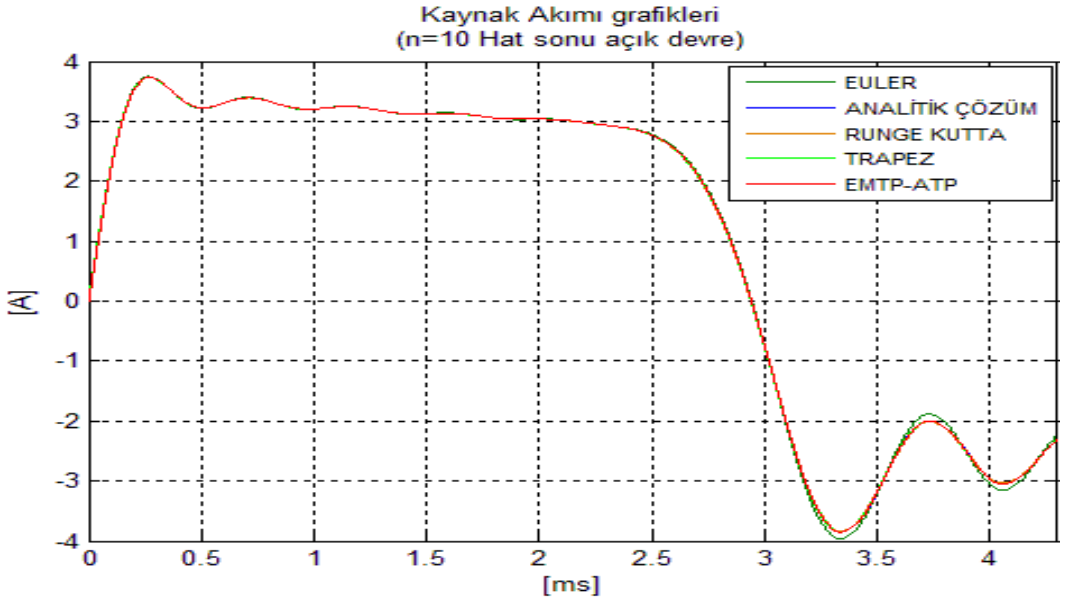



*Şekil 4.12. Uygulama 4.1'e ait n=5 için kaynak akımı*

$n = 10$ için nümerik integral yöntemleri ve EMTP-ATP programından elde edilen hat sonu gerilim ve kaynak akımı grafikleri, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde; Euler yöntemi hesaplama hassasiyetinde zaman ilerledikçe azalma meydana geldiği görülmektedir, diğer yöntemlerde ise belirgin bir sapma gözlenmemektedir.

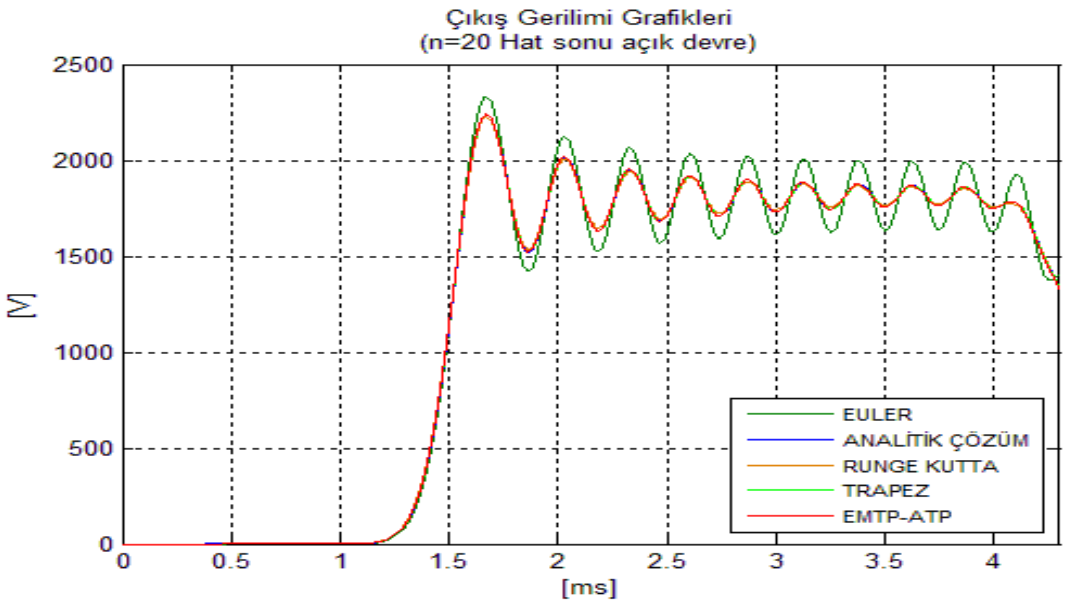



*Şekil 4.13. Uygulama 4.1'e ait hat sonu geriliminin n=10 için toplu gösterimi*

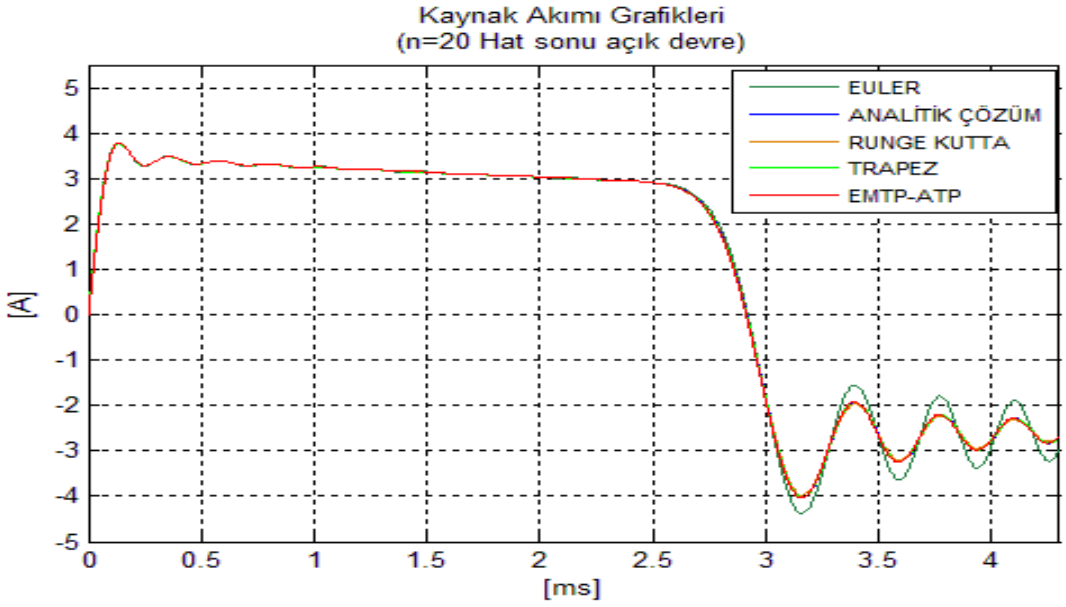



*Şekil 4.14. Uygulama 4.1'e ait n=10 için kaynak akımı*

$n = 20$ için nümerik integral yöntemleri ve EMTP-ATP programından elde edilen hat sonu gerilim ve kaynak akımı grafikleri, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde; Euler yöntemindeki sapma oranının belirgin bir biçimde zamanla doğru orantılı olarak arttığı, diğer yöntemlerde ise belirgin bir sapma gözlenmemektedir.

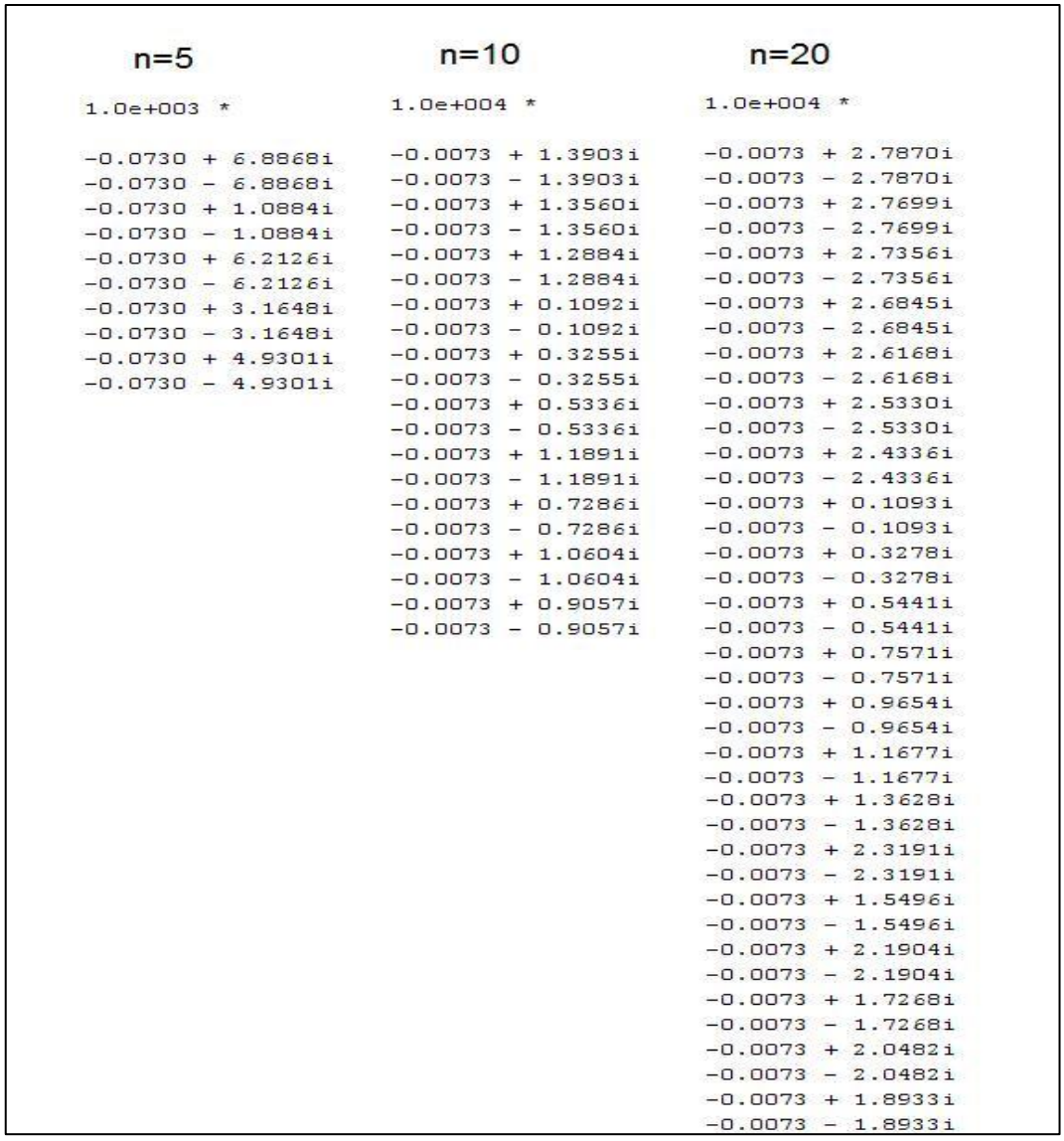



*Şekil 4.15. Uygulama 4.1'e ait n=20 için hat sonu gerilimi*



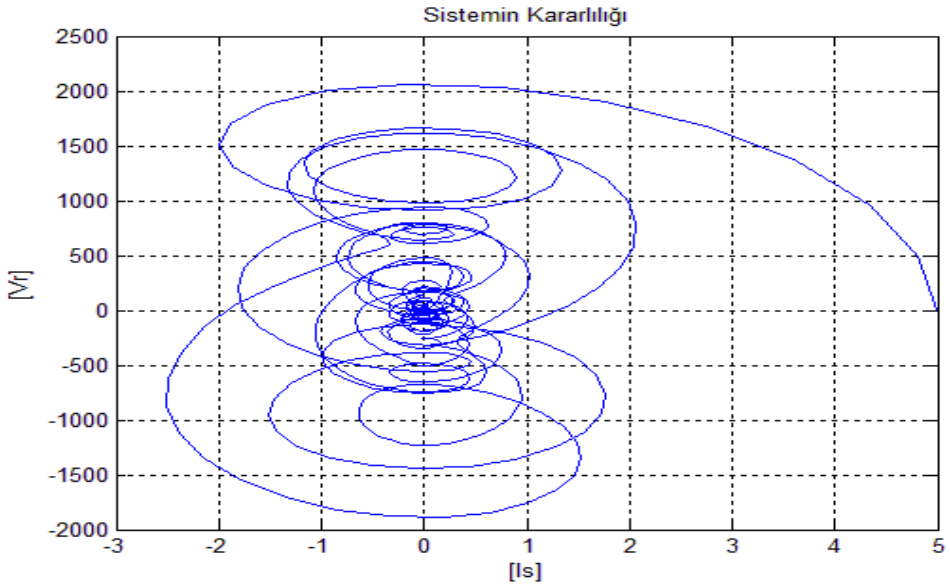

*Şekil 4.16.Uygulama 4.1'e ait n=20 için kaynak akımı*

Sistemin kararlılığını incelerken, A durum matrisinin özdeğerleri incelenmiştir. Uygulama 4.1.'in A durum matrisinin (Ek.1), c özdeğerler matrisi, bölüm sayısına göre Şekil 4.17'de gösterilmiştir.




*Şekil 4.17. Uygulama 4.1'e ait A durum matrisinin özdeğerleri*

Şekil 4.17 incelendiğinde; özdeğerlerin reel kısmının negatif olduğu, bundan dolayı Uygulama 4.1'deki sistemin asimptotik kararlı olduğu görülmektedir. Uygulama 4.1'deki sistem başlangıç koşullarına yakın bir değerde başlatılmış ve Şekil 4.18'deki grafik elde edilmiştir. Grafikten sistemin tekrar başlangıç koşullarına geri döndüğü görülmektedir. Bu da sistemin asimptotik kararlı olduğunu gösterir.




*Şekil 4.18. Uygulama 4.1 kararlılık grafiği*

Uygulama 4.1.'in analizinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

• Euler yöntemi, Trapez yöntemi, Runge Kutta yöntemi ve analitik çözüm yöntemiyle elde edilen grafikler, EMTP-ATP Programından elde edilen grafikle karşılaştırılarak hata oranları, Çizelge 4.2'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Uygulama 4.1 için kullanılan Yöntemler hata oranları

| **Bölüm Sayısı** | **Kullanılan Yöntemler** | **Hat Sonu Açık Devre Durumu** |
|---|---|---|
| | | **Hata Oranı (%)** |
| n=5 | Euler | 0.135 |
| | Runge kutta | 0.0243 |
| | Trapez | 0.04 |
| | Analitik | 0.0134 |
| n=10 | Euler | 0.215 |
| | Runge kutta | 0.0246 |
| | Trapez | 0.0382 |
| | Analitik | 0.0128 |
| n=20 | Euler | 0.42 |
| | Runge kutta | 0.0239 |
| | Trapez | 0.0362 |
| | Analitik | 0.0262 |

• Euler yöntemi, Trapez yöntemi, Runge Kutta yöntemi, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP Programından elde edilen grafikler, Çizelge 4.3'de belirtilen sürede elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Uygulama 4.1'e ait grafiklerin elde edilme süreleri

| **Kullanılan Yöntem** | **Hat Sonu Açık Devre Durumu** |
|---|---|
| | **Geçen Süre (sn)** |
| Euler | 12,4 |
| Runge kutta | 12,6 |
| Trapez | 12,7 |
| Analitik | 70695,0 |

- Çizelge 4.3'de verilen süreler içerisinde Euler yöntemi daha hızlı çalışıyor görünmesine rağmen, $h = 1\ \mu s'$den daha büyük adım aralığında sonuç elde edilememiştir.
- Analitik çözüm yöntemiyle, $h = 1\ ms$ adım aralığında bile sonuç elde edilmiştir. Aynı adım aralığında EMTP-ATP programının, analitik çözüm yöntemi kadar hassas olmadığı görülmüştür.
- MATLAB programıyla hazırlanmış olan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemine ait algoritmalardan elde edilen sonuçlar, EMTP-ATP programından elde edilen sonuçlar kadar hassas ve doğru sonuç vermektedirler. Fakat analitik çözüm yöntemi diğer yöntemlere oranla daha yavaş çalışmaktadır ve $n = 5$'ten büyük bölüm sayısı için MATLAB programı sembolik integral işlemini gerçekleştirememiştir. Bu yüzden integralın sonucu bulunarak algoritmaya yazılmış ve $n = 20$ bölüm için sonuçlar elde edilmiştir.
- Elde edilen grafiklerden, geçici rejim cevabının yavaş sönümlü olduğu ve gerilim tepe değerlerinin oldukça büyük olduğu görülmektedir. İletim hattı bölüm sayısı arttığında, gerilim ve akımda dalgalanmalar da artmıştır. İletim hattı koruyucu teçhizatı ve izolasyon malzemeleri seçilirken bu uygulamada elde edilmiş olan sonuçlardan yararlanılabilir.

**Uygulama 4.2**

Giriş gerilimi $u(t)$ ve hat sonu omik yük ($R = 1000\ \Omega$) bağlı olan, 300 $km$ uzunluğundaki bir iletim hattı, toplu parametreli $n = 20$ devreden oluşmuştur. Bu iletim hattının tahmini hat parametreleri (477 MCM iletkeni için) ve giriş gerilimi;

$u(t) = 1000\ V$

$r = 0.2\ \Omega/km$

$l = 1.37\ mH/km$

$c = 8.37\ nF/km$

şeklindedir.

Bu uygulamada; iletim hattı π modeli baz alınarak, durum uzay teknikleri ile hat sonu gerilimi ve kaynak akımının geçici rejim cevapları analiz edilmiştir. Ayrıca sistemin kararlılığı incelenmiştir.

**Çözüm 4.2**

Bu uygulamada; hat sonu omik yük bağlı olan bir enerji iletim hattına, enerji verilmesi esnasında meydana gelen aşırı gerilim ile aşırı akım dalgalarının iletim hattı izolasyonu ve koruyucu teçhizat üzerindeki etkisini incelemek, ayrıca nümerik integral ile analitik çözüm yöntemlerinden elde edilen sonuçların doğruluğunu ispatlanması amaçlanmıştır. Öncelikle, toplu parametreli devre sayısı $n = 20$ için hat parametreleri Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

*Çizelge 4.4. Uygulama 4.2' deki iletim hattına ait hat parametreleri*

| $n = 20$ |
|---|
| $R = 0.2 * 15 = 3\ \Omega$ |
| $L = 1.37 * 15 = 20.5\ mH$ |
| $C = 8.37 * 15 = 12{,}51\ nF$ |

Çizelge 4.4'de verilen hat parametreleri, denklem 3.7'de yerlerine yazılarak, iletim hattının karakteristik empedansı yaklaşık (iletim hattı π modeli için $l = 1.37mH/km, r = 0.2\Omega/km, C = 16.74nF/km$ parametreleri kullanılmıştır),

$z_0 = \sqrt{\frac{R+jwL}{jwC}} \approx 300\ \Omega$

olarak bulunmuştur. İletim hattı üzerinde ilerleyen gerilim dalgası d uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna $\tau$ süresinde ulaşır. $300\,km$ uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna gerilim dalgasının varma süresi (gecikme süresi),

$$\tau = d\sqrt{LC} = 1.4\,ms$$

olarak elde edilmiştir. Geçici hal esnasında kaynak akımı yaklaşık,

$$I_s = \frac{U_0}{Z_0} \approx 3.33\ \mathrm{A}$$

olarak bulunmuştur. Denklem 3.17 kullanılarak gerilim yansıma katsayısı,

$$\Gamma = \frac{R - Z_0}{R + Z_0} = 0{,}53$$

olarak elde edilmiştir. Fakat bu uygulamada hattın seri direncinden dolayı gelen gerilim dalgası zayıflayacaktır. Gerilim dalgasının hat sonuna varma süresinde, yani $t = 1.4\,ms$ esnasında ki değeri, denklem 3.43 kullanılarak yaklaşık,

$$u_i = U_0 e^{-\left(\frac{R}{2Z}\right)vt} = U_0 e^{-t/T} \approx 903\,V$$

olarak elde edilmiştir. Bu durumda $\tau$ süresi sonunda hat sununda yansıyan gerilim dalgası,

$$u_y = 903 * 0{,}53 = 478{,}6\,V$$

olarak bulunmuştur. Hat sonu gerilimi;

$$V_r = u_i + u_y = 1381{,}6\,V$$

olarak elde edilmiştir.

Uygulama 4.2'nin durum denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ i_n \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & . & . & . & . & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} & . & . & . & . & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & . & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} & . & . & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & 0 \\ 0 & \dots & & & & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \dots & & & & & 0 & \frac{2}{C} & -\frac{2*(G*RA+1)}{C*RA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ i_n \\ v_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \qquad (4.2)$$

MATLAB programını kullanılarak bu uygulamanın geçici hal analizi yapılmıştır. Öncelikle, toplu parametreli devre sayısı $n = 20$ için denklem 4.2 ifadesi, MATLAB programı kullanılarak hazırlanan algoritmayla (Ek.1), sayısal ortamda kullanılmak üzere elde edilmiştir. Elde edilen durum denklemlerini yine MATLAB programı kullanılarak algoritmaları yazılan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle çözülerek, sistemin geçici rejim cevabı ve kararlılığı incelenmiştir. Bu uygulamada nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleri için adım aralığı $h = 0.000001$ ve zaman aralığı $t = 0 - 0.0043\ sn$ olarak alınmıştır.

Sırasıyla Euler, Runge Kutta, Trapez, analitik çözüm yöntemleri ve EMTP-ATP programıyla elde edilen kaynak akımı ve hat sonu gerilimleri elde edilerek grafikler üzerinden gösterilmiştir. Euler yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Şekil 4.19 incelendiğinde; gelen gerilim dalgasının hat sonuna varma süresi (gecikme süresi), yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

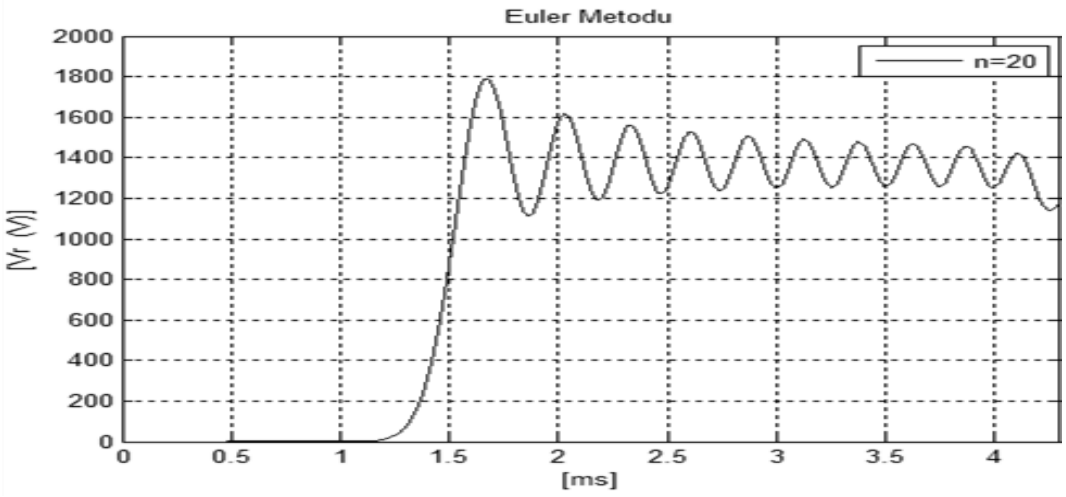
$\Gamma = \frac{R-Z_0}{R+Z_0} = 0{,}53$

$V_r \approx 1380\ V$

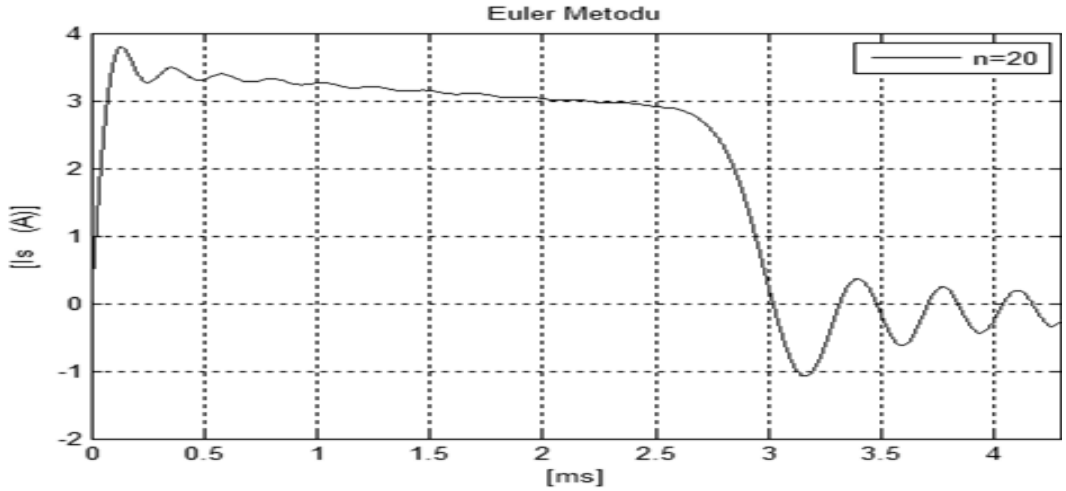
olduğu görülmektedir. Hat sonunda omik yük bağlanması durumunda çıkış geriliminin düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.20 incelendiğinde; kaynaktan çekilen akımın yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.19. Uygulama 4.2 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.20. Uygulama 4.2 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Runge Kutta yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'da gösterilmiştir. Şekil 4.21 incelendiğinde; gelen gerilim dalgasının hat sonuna varma süresi (gecikme süresi), yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

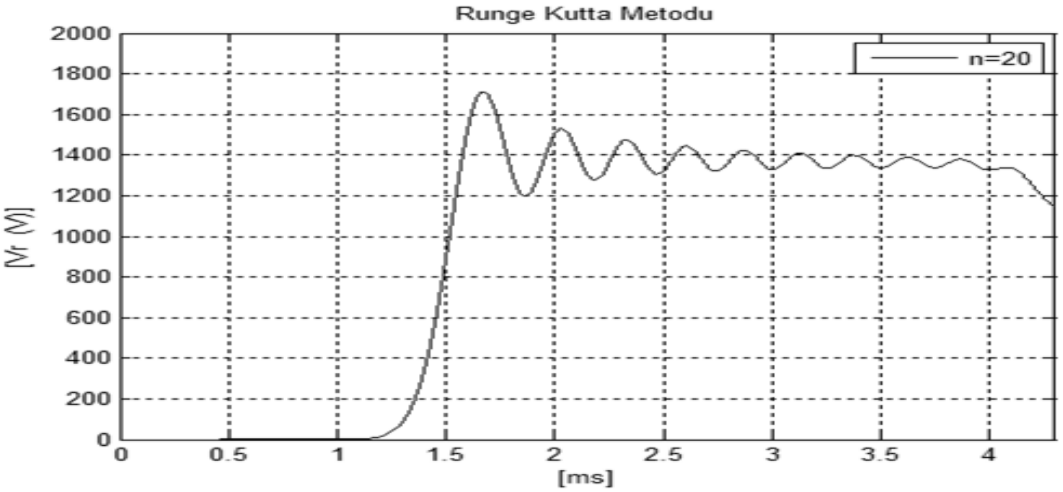
$\Gamma = \frac{R-Z_0}{R+Z_0} = 0{,}53$

$V_r \approx 1380\ V$

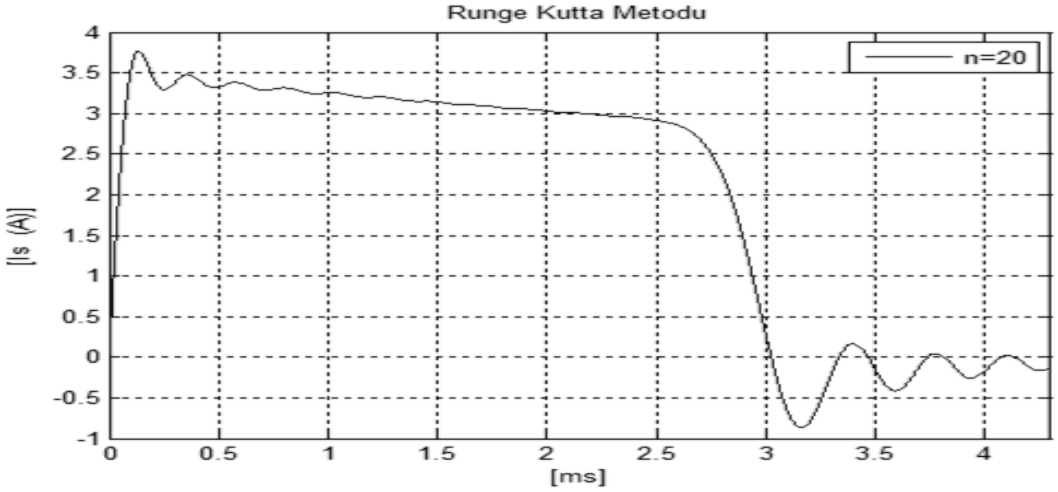
olduğu görülmektedir. Hat sonunda omik yük bağlanması durumunda çıkış geriliminin düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.22 incelendiğinde; kaynaktan çekilen akımın yaklaşık,

$$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.21. Uygulama 4.2 için* Runge Kutta *yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.22. Uygulama 4.2 için* Runge Kutta *yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Trapez yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Şekil 4.23 incelendiğinde; gelen gerilim dalgasının hat sonuna

varma süresi (gecikme süresi), yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

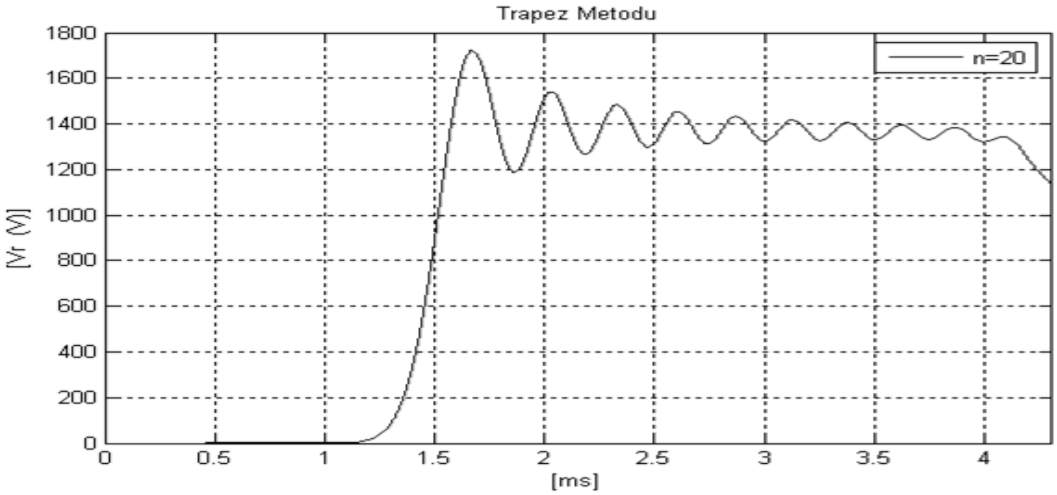
$\Gamma = \frac{R-Z_0}{R+Z_0} = 0{,}53$

$V_r \approx 1380\ V$

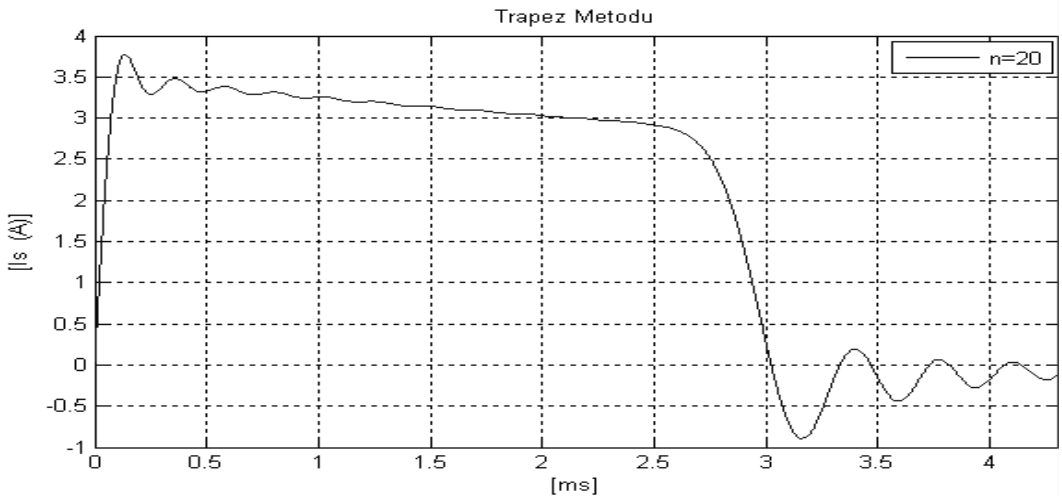
olduğu görülmektedir. Hat sonunda omik yük bağlanması durumunda çıkış geriliminin düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.24 incelendiğinde; kaynaktan çekilen akımın yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.23. Uygulama 4.2 için* Trapez *yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.24. Uygulama 4.2 için* Trapez *yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Analitik çözüm yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Şekil 4.25 incelendiğinde; gelen gerilim dalgasının hat sonuna varma süresi (gecikme süresi), yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\, ms$

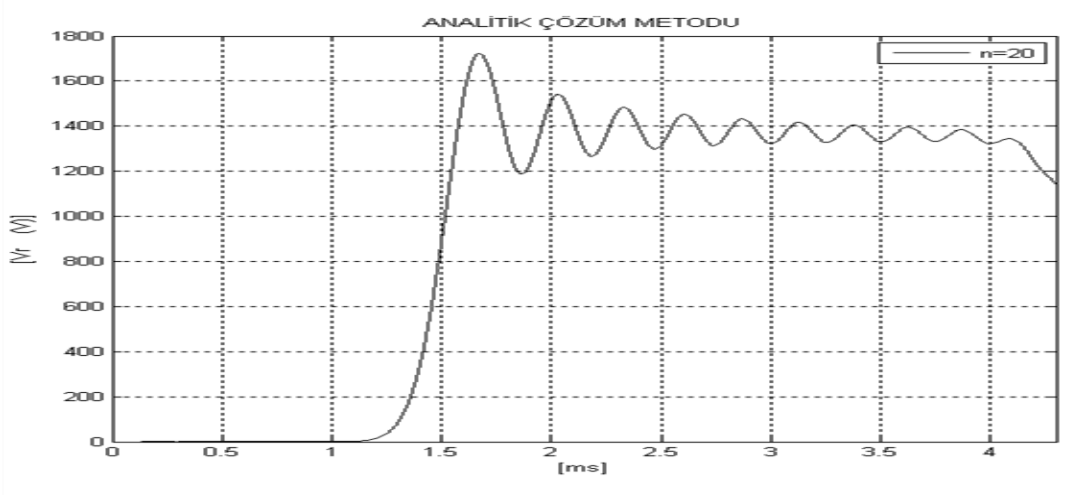
$\Gamma = \frac{R-Z_0}{R+Z_0} = 0{,}53$

$V_r \approx 1380\, V$

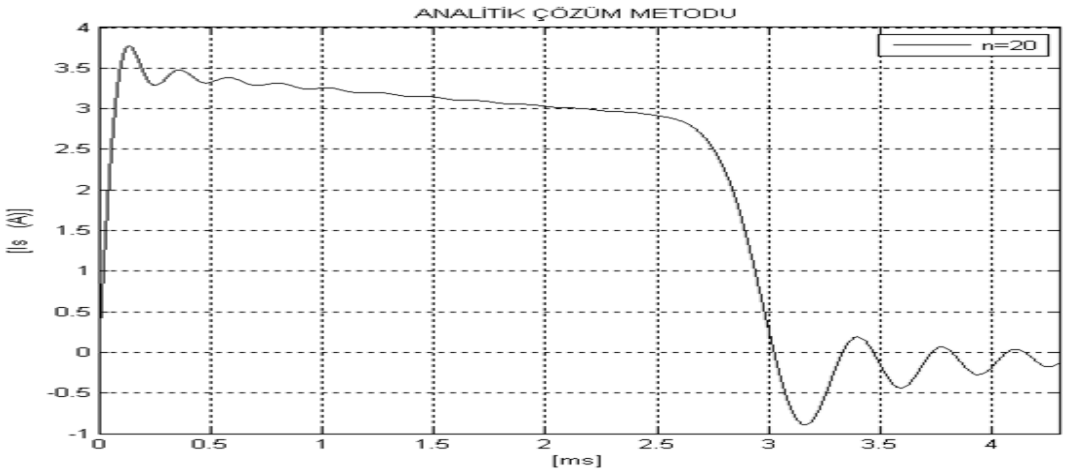
olduğu görülmektedir. Hat sonunda omik yük bağlanması durumunda çıkış geriliminin düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.26 incelendiğinde; kaynaktan çekilen akımın yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.25. Uygulama 4.2 için analitik yöntem ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.26. Uygulama 4.2 için analitik yöntem ile elde edilen kaynak akımı*

EMTP-ATP Programı ile elde edilen grafikler, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Şekil 4.27 incelendiğinde; gelen gerilim dalgasının hat sonuna varma süresi (gecikme süresi), yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

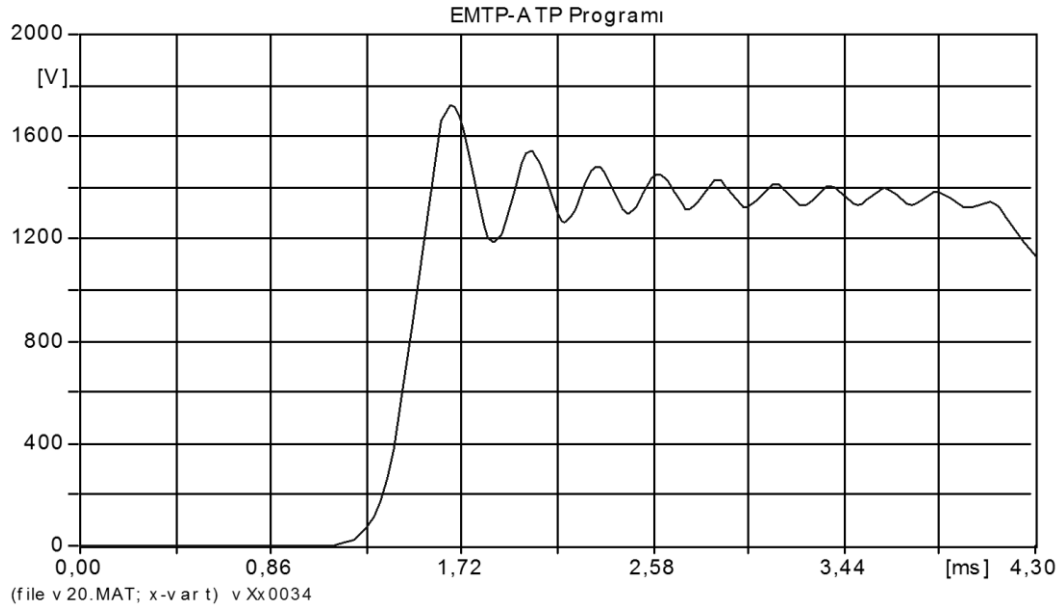
$\Gamma = \frac{R-Z_0}{R+Z_0} = 0{,}53$

$V_r \approx 1380\ V$

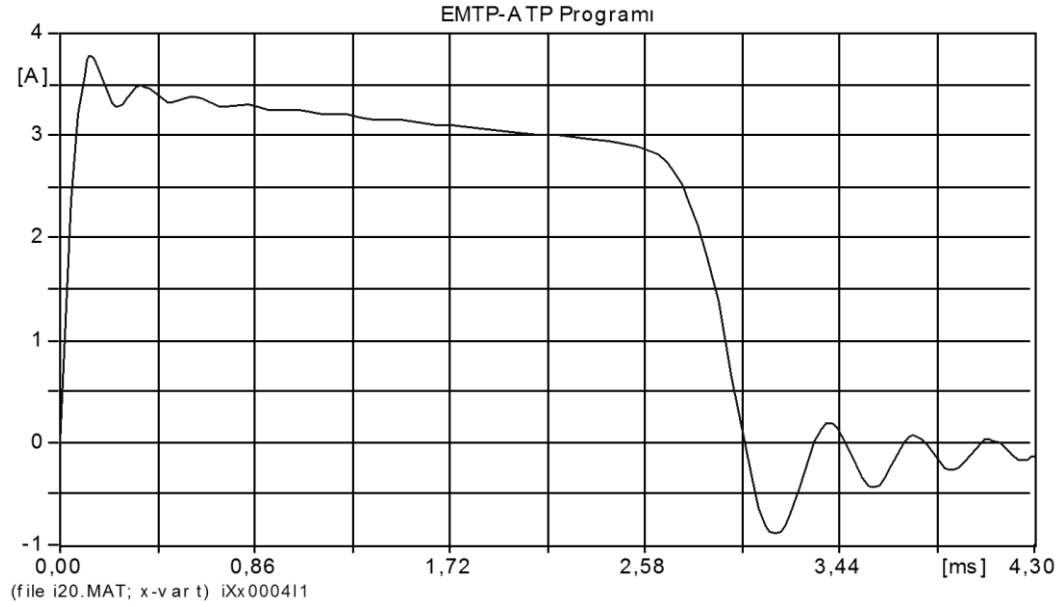
olduğu görülmektedir. Hat sonunda omik yük bağlanması durumunda çıkış geriliminin düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.28 incelendiğinde; kaynaktan çekilen akımın yaklaşık,

$$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$$

olduğu görülmektedir.

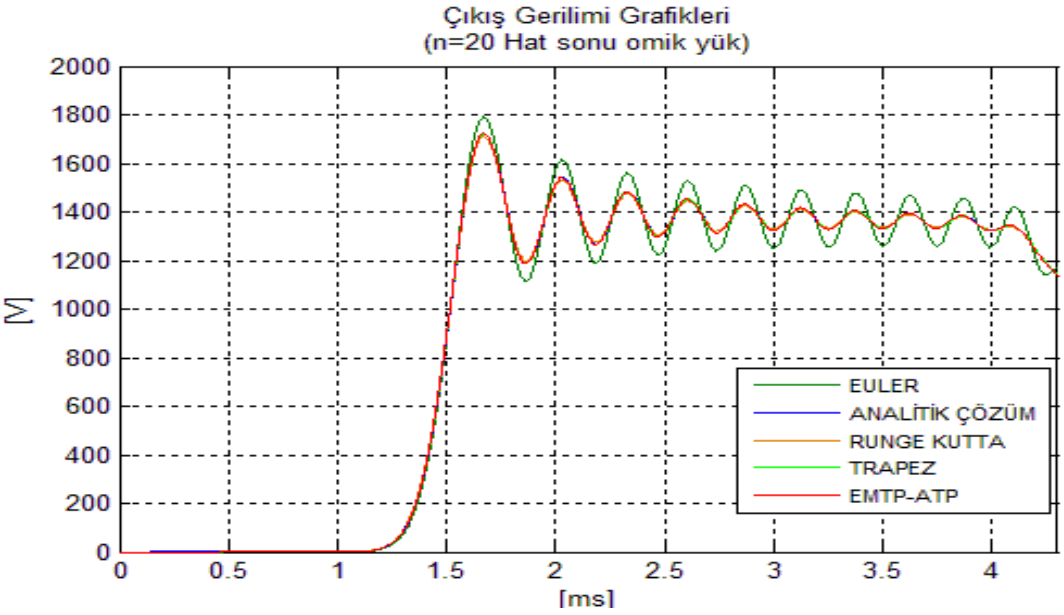



*Şekil 4.27. Uygulama 4.2 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilimi*

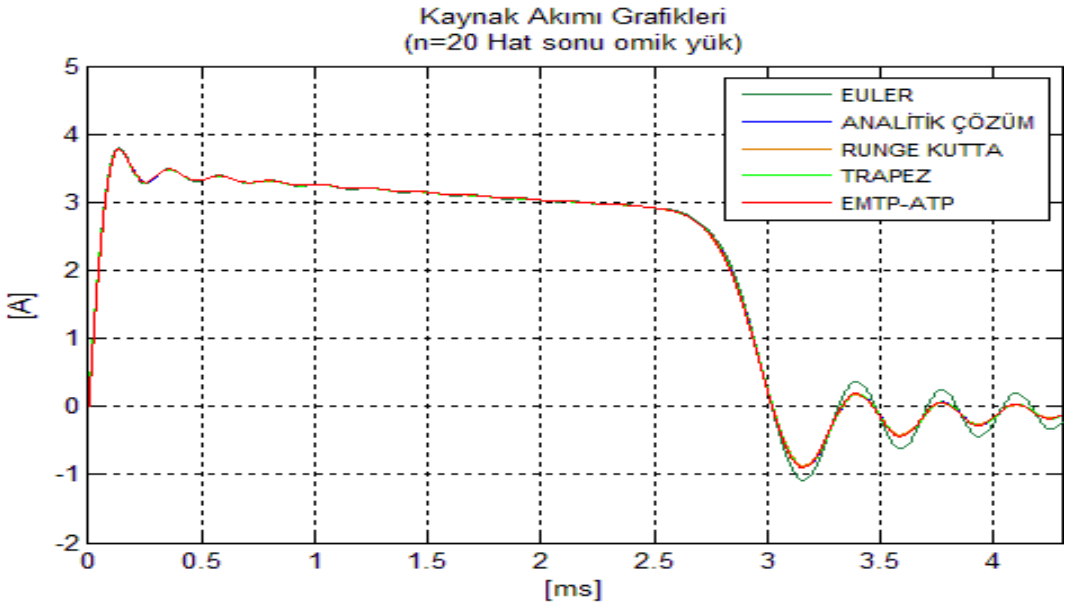



*Şekil 4.28. Uygulama 4.2 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı*

Nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle elde edilen sonuçların doğruluğunu göstermek için akım ve gerilim grafikleri, EMTP-ATP programı ile elde edilen sonuçla karşılaştırılmıştır. $n = 20$ için nümerik integral yöntemleri, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP programından elde edilen hat sonu gerilim ve kaynak akımı grafikleri, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Şekil 4.29 ve Şekil 4.30 incelendiğinde; zaman ilerledikçe, Euler yöntemi hesaplama hassasiyetinde azalma meydana geldiği, diğer yöntemlerde belirgin bir sapma olmadığı gözlemlenmektedir.




*Şekil 4.29. Uygulama 4.2'ye ait n=20 için hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.30. Uygulama 4.2'ye ait n=20 için kaynak akımı*

Sistemin kararlılığı incelenirken, sisteme ait A durum matrisinin özdeğerlerine bakılmıştır. Uygulama 4.2'nin A durum matrisinin (Ek.1), c özdeğerler matrisi, Şekil 4.31'de gösterilmiştir.

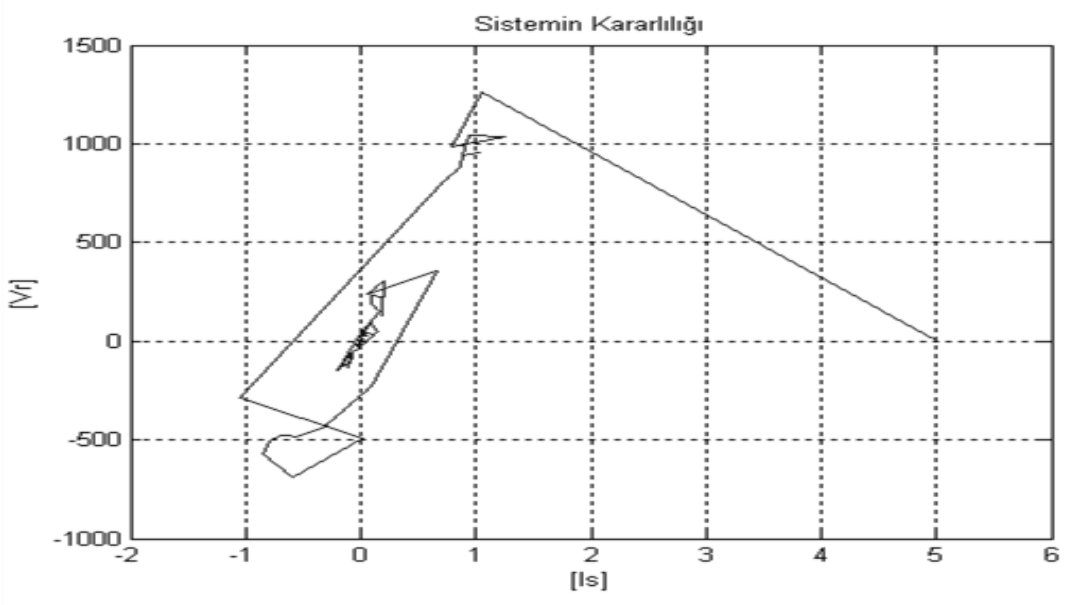
```
n=20

1.0e+004 *

-0.0276 + 0.1106i
-0.0276 - 0.1106i
-0.0278 + 0.3282i
-0.0278 - 0.3282i
-0.0279 + 0.5444i
-0.0279 - 0.5444i
-0.0279 + 0.7573i
-0.0279 - 0.7573i
-0.0279 + 0.9655i
-0.0279 - 0.9655i
-0.0280 + 1.1678i
-0.0280 - 1.1678i
-0.0281 + 1.3629i
-0.0281 - 1.3629i
-0.0088 + 2.7808i
-0.0088 - 2.7808i
-0.0138 + 2.7559i
-0.0138 - 2.7559i
-0.0239 + 2.7167i
-0.0239 - 2.7167i
-0.0360 + 2.6721i
-0.0360 - 2.6721i
-0.0345 + 2.6137i
-0.0345 - 2.6137i
-0.0316 + 2.5320i
-0.0316 - 2.5320i
-0.0302 + 2.4331i
-0.0302 - 2.4331i
-0.0294 + 2.3189i
-0.0294 - 2.3189i
-0.0281 + 1.5496i
-0.0281 - 1.5496i
-0.0289 + 2.1903i
-0.0289 - 2.1903i
-0.0282 + 1.7268i
-0.0282 - 1.7268i
-0.0286 + 2.0481i
-0.0286 - 2.0481i
-0.0284 + 1.8933i
-0.0284 - 1.8933i
```

*Şekil 4.31. Uygulama 4.2'nin A durum matrisinin özdeğerleri*

Uygulama 4.2'nin özdeğerlerinin reel kısımları negatif olduğundan, sistem asimptotik kararlıdır. Uygulama 4.2 başlangıç koşullarına yakın bir değerde başlatılmış ve Şekil 4.32'deki grafik elde edilmiştir. Grafikten sistemin kısa süre içerisinde başlangıç koşullarına geri döndüğü görülmektedir. Bu da sistemin asimptotik kararlı olduğunu gösterir.




*Şekil 4.32. Uygulama 4.2 kararlılık grafiği*

Uygulama 4.2'nin analizinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Euler yöntemi, Trapez yöntemi, Runge Kutta yöntemi, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP Programından, Çizelge 4.5'te belirtilen sürede sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. *Uygulama 4.2'ye ait grafiklerin elde edilme süreleri*

| **Kullanılan Yöntem** | **Hat sonu omik yük durumu** |
|---|---|
| | **Geçen Süre (sn)** |
| Euler | 7,21 |
| Runge kutta | 7,37 |
| Trapez | 7,49 |
| Analitik | 65250,00 |

- Çizelge 4.5'de verilen süreler içerisinde Euler yöntemi daha hızlı çalışıyor görünmesine rağmen, $h = 1\ \mu s$'den daha büyük adım aralığında sonuç elde edilememiştir.
- Analitik çözüm yöntemiyle, $h = 1\ ms$ adım aralığında bile sonuç elde edilmiştir. Aynı adım aralığında EMTP-ATP programının, analitik çözüm yöntemi kadar hassas olmadığı görülmüştür.
- MATLAB programıyla hazırlanmış olan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemine ait algoritmalardan elde edilen sonuçlar, EMTP-ATP programından

elde edilen sonuçlar kadar hassas ve doğru sonuç vermektedirler. Fakat analitik çözüm yöntemi diğer yöntemleri oranla daha yavaş çalışmaktadır ve $n = 5$ ten büyük bölüm sayısı için MATLAB programı sembolik integral işlemini gerçekleştirememiştir. Bu yüzden integralın sonucu bulunarak algoritmaya yazılmış ve $n = 20$ bölüm için sonuçlar elde edilmiştir.

- Elde edilen grafiklerden, geçici rejim cevabının yavaş sönümlü olduğu ve gerilim tepe değerlerinin oldukça büyük olduğu görülmektedir. İletim hattı sonuna omik yük bağlandığında geçici rejim süresince, gerilimin yüke bağlı olarak değiştiği görüldü.
- İletim hattı koruyucu teçhizatı ve izolasyon malzemeleri seçilirken bu uygulamada elde edilmiş olan sonuçlardan yararlanılabilir.

**Uygulama 4.3**

Giriş gerilimi $u(t)$ ve hat sonu kapasitif yük ($C = 1\ \mu F$) bağlı olan $300\ km$ uzunluğundaki bir iletim hattı, toplu parametreli $n = 20$ devreden oluşmuştur. Bu iletim hattının tahmini hat parametreleri (477 MCM iletkeni için) ve giriş gerilimi;

$u(t) = 1000\ V$
$r = 0.2\ \Omega/km$
$l = 1.37\ mH/km$
$c = 8.37\ nF/km$

şeklindedir.

Bu uygulamada, iletim hattı π modeli baz alınarak, durum uzay teknikleri ile hat sonu gerilimi ve kaynak akımının geçici rejim cevapları analiz edilmiştir. Ayrıca sistemin kararlılığı incelenmiştir.

**Çözüm 4.3**

Bu uygulamada; hat sonu kapasitif yük bağlı olan bir enerji iletim hattına, enerji verilmesi esnasında meydana gelen aşırı gerilim ile aşırı akım dalgalarının iletim hattı izolasyonu ve koruyucu teçhizat üzerindeki etkisini

incelemek, ayrıca nümerik integral ile analitik çözüm yöntemlerinden elde edilen sonuçların doğruluğunu ispatlanması amaçlanmıştır.

Öncelikle, toplu parametreli devre sayısı $n = 20$ için iletim hattına ait hat parametreleri, Çizelge 4.6'daki gibi elde edilmiştir.

*Çizelge 4.6. Uygulama 4.3' deki iletim hattına ait hat parametreleri*

| $n = 20$ |
|---|
| $R = 0.2 * 15 = 3\,\Omega$ |
| $L = 1.37 * 15 = 20.5\,mH$ |
| $C = 8.37 * 15 = 12{,}51\,nF$ |

Çizelge 4.6'da verilen hat parametreleri, denklem 3.7'de yerlerine yazılarak, iletim hattının karakteristik empedansı yaklaşık (iletim hattı π modeli için $l = 1.37mH/km, r = 0.2\Omega/km, C = 16.74nF/km$ parametreleri kullanılmıştır),

$$z_0 = \sqrt{\frac{R+jwL}{jwC}} \approx 300\,\Omega$$

olarak bulunmuştur. İletim hattı üzerinde ilerleyen gerilim dalgası d uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna $\tau$ süresinde ulaşır. $300\,km$ uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna gerilim dalgasının varma süresi,

$$\tau = d\sqrt{LC} = 1.4\,ms$$

olarak elde edilmiştir. Geçici hal esnasında kaynak akımı yaklaşık,

$$I_s = \frac{U_0}{Z_0} \approx 3.33\ \mathrm{A}$$

olarak elde edilmiştir. Denklem 3.36'dan gerilim yansıma katsayısı ( $t = 1.4\,ms$ anında),

$$\Gamma = \frac{u_y}{u_i} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} = 0.991$$

olarak elde edilmiştir. Fakat bu uygulamada, hattın seri direncinden dolayı gelen gerilim dalgası zayıflayacaktır. Gerilim dalgasının hat sonuna varma süresinde, yani $t = 1.4\,ms$ esnasında gelen gerilim dalgası, denklem 3.43 kullanılarak yaklaşık,

$$u_i = U_0 e^{-\left(\frac{R}{2Z}\right)vt} = U_0 e^{-t/T} \approx 903\,V$$

olarak bulunmuştur. Bu durumda $\tau$ süresi sonunda hat sonunda yansıyan gerilim dalgası,

$$u_y = 903 * 0{,}991 = 894.8\,V$$

olarak elde edilmiştir. Hat sonu gerilimi;

$$V_r = u_i + u_y = 1797.8\,V$$

olarak bulunmuştur.

Uygulama 4.3'ün durum denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ i_n \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & . & . & . & . & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} & . & . & . & . & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & . & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} & . & . & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & 0 \\ 0 & \ldots & & & & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \ldots & & & & & 0 & \frac{2}{C+2*CA} & -\frac{2G}{C+2*CA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ i_n \\ v_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \qquad (4.3)$$

MATLAB programını kullanarak bu uygulamanın geçici hal analizi yapılmıştır. Öncelikle, toplu parametreli devre sayısı n=20 için denklem 4.3 ifadesi, MATLAB programı kullanılarak hazırlanan algoritmayla (Ek.1), sayısal ortamda kullanılmak üzere elde edilmiştir. Elde edilen durum denklemlerini yine MATLAB programı kullanılarak algoritmaları yazılan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle çözülerek, sistemin geçici rejim cevabı ve kararlılığı

incelenmiştir. Bu uygulamada nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleri için adım aralığı $h = 0.000001$ ve zaman aralığı $t = 0 - 0.0043\ sn$ olarak alınmıştır.

Sırasıyla Euler, Runge Kutta, Trapez, analitik çözüm yöntemleri ve EMTP-ATP programıyla elde edilen kaynak akımı ve hat sonu gerilimleri grafiklerle gösterilmiştir. Euler yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de gösterilmiştir. Şekil 4.33 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

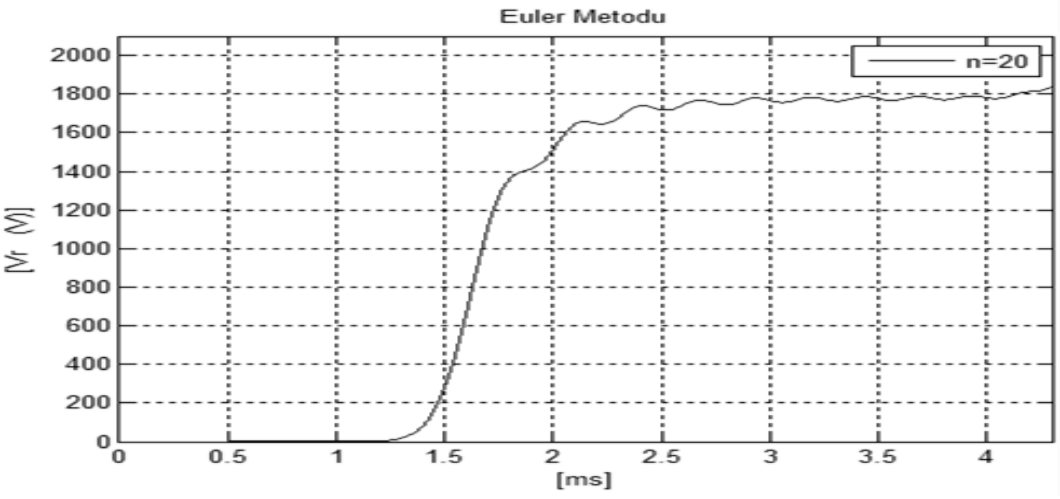
$\Gamma = \frac{u_y}{u_i} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} = 0.991$

$V_r \approx 1800\ V$

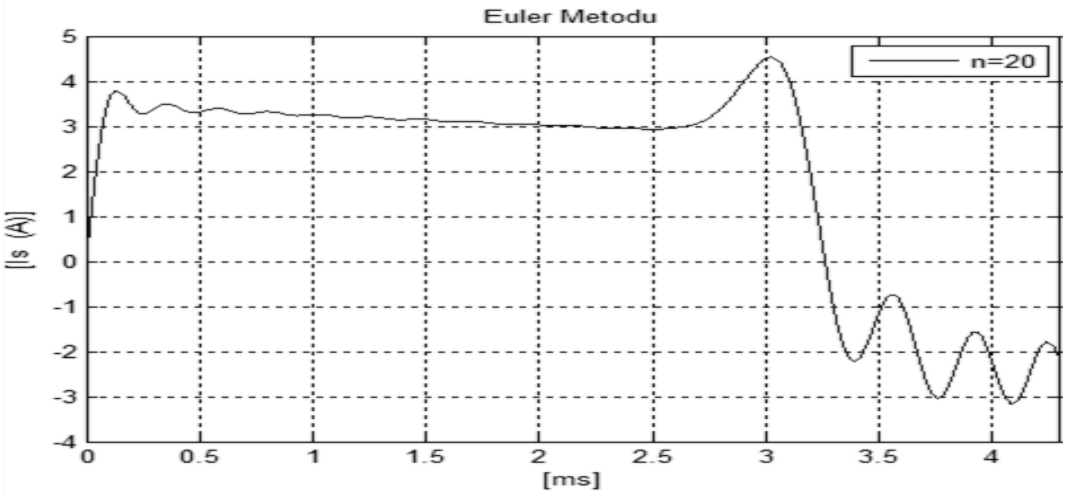
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, kapasitif yükten dolayı yansıyan gerilim dalgası gittikçe artar ve sonuçta +1 değerine ulaşır. Hat sonuna kapasitif yük bağlanması, çıkış geriliminde dalgalanmaları azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.34 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.33. Uygulama 4.3 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.34. Uygulama 4.3 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Runge Kutta yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Şekil 4.35 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

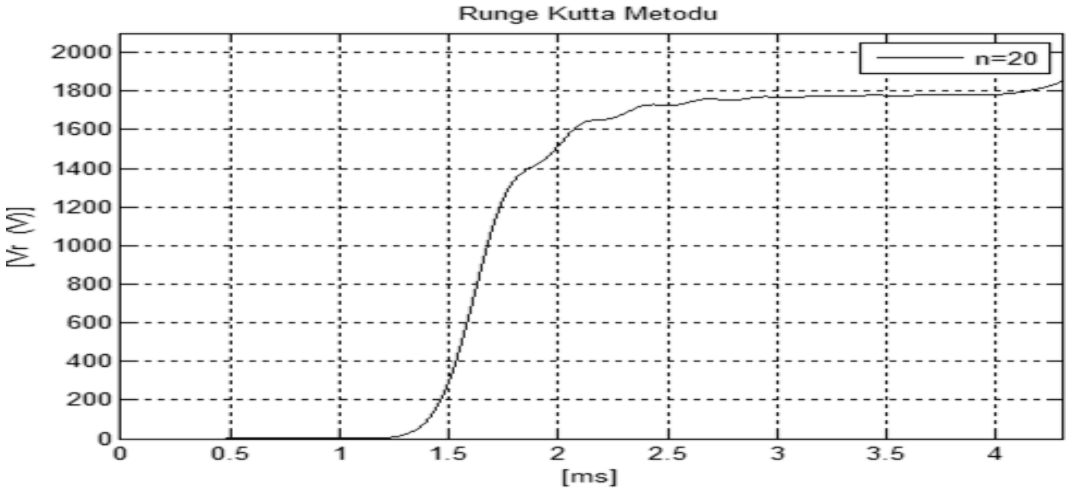
$\Gamma = \frac{u_y}{u_i} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} = 0.991$

$V_r \approx 1800\ V$

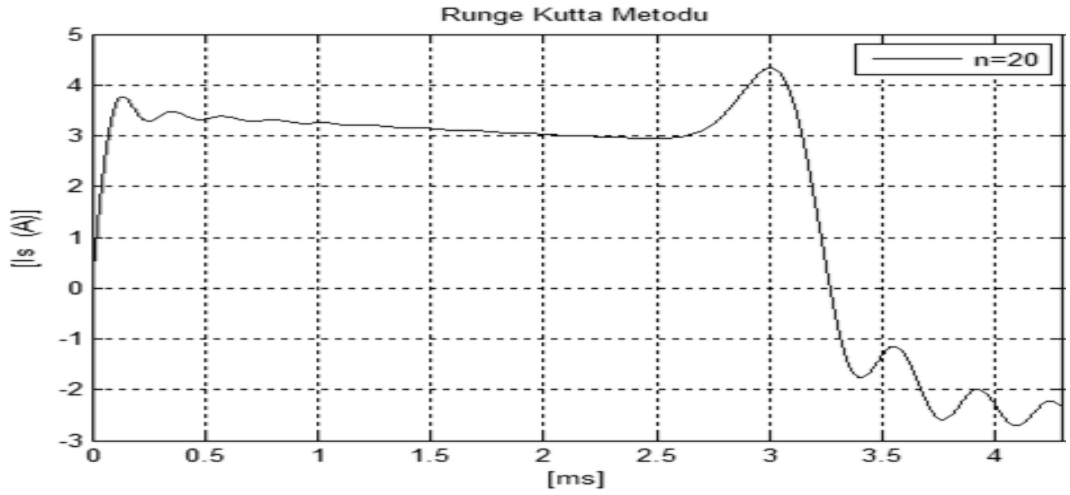
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, kapasitif yükten dolayı yansıyan gerilim dalgası gittikçe artar ve sonuçta yansıma oranı +1 değerine ulaşır. Hat sonuna kapasitif yük bağlanması, çıkış gerilimindeki dalgalanmaları azalttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.36 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.35. Uygulama 4.3 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.36. Uygulama 4.3 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Trapez yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de gösterilmiştir. Şekil 4.37 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\, ms$

$\Gamma = \frac{u_y}{u_i} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} = 0.991$

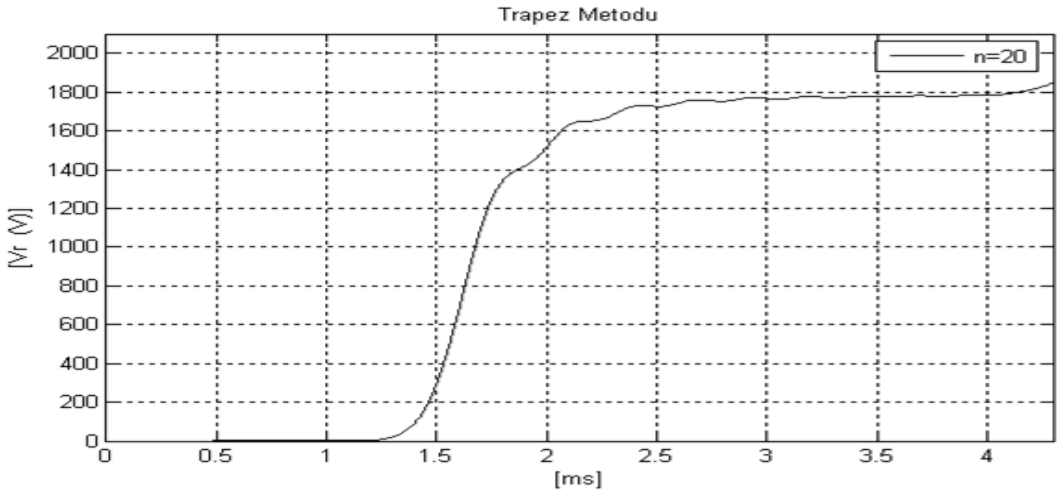
$V_r \approx 1800\, V$

olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, kapasitif yükten dolayı yansıyan gerilim dalgası gittikçe artar ve sonuçta yansıma oranı +1 değerine ulaşır. Hat

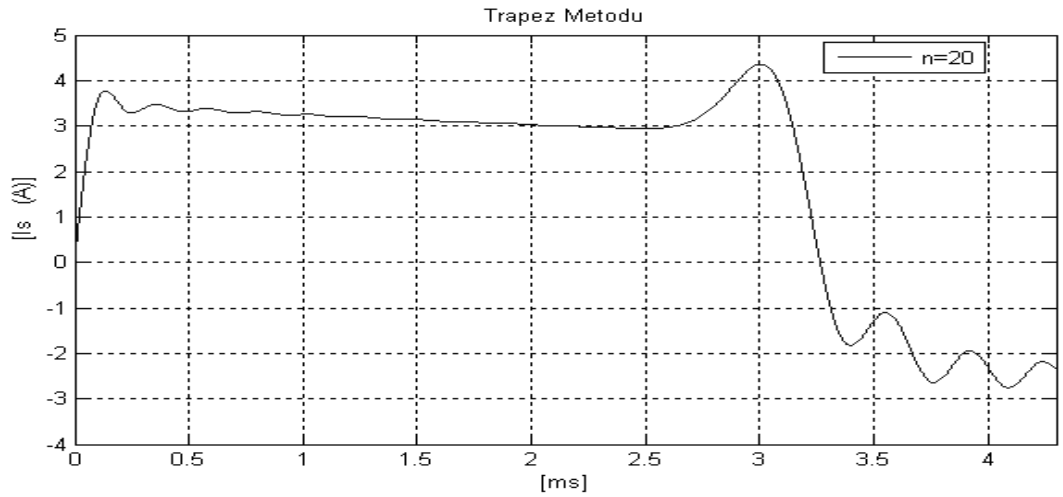
sonuna kapasitif yük bağlanması, çıkış gerilimindeki dalgalanmaları azalttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.38 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.37. Uygulama 4.3 için Trapez yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.38. Uygulama 4.3 için Trapez yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Analitik çözüm yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Şekil 4.39 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\, ms$

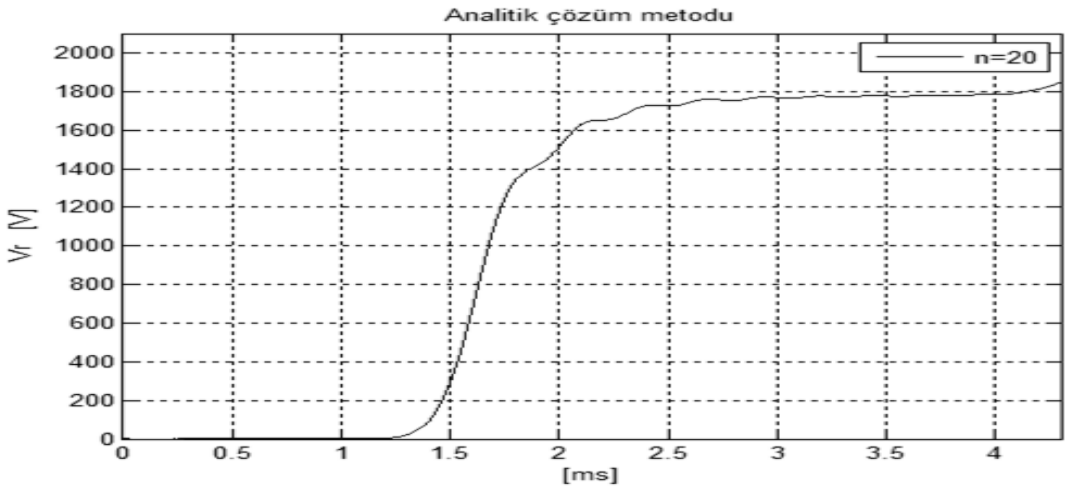
$\Gamma = \frac{u_y}{u_i} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} = 0.991$

$V_r \approx 1800\, V$

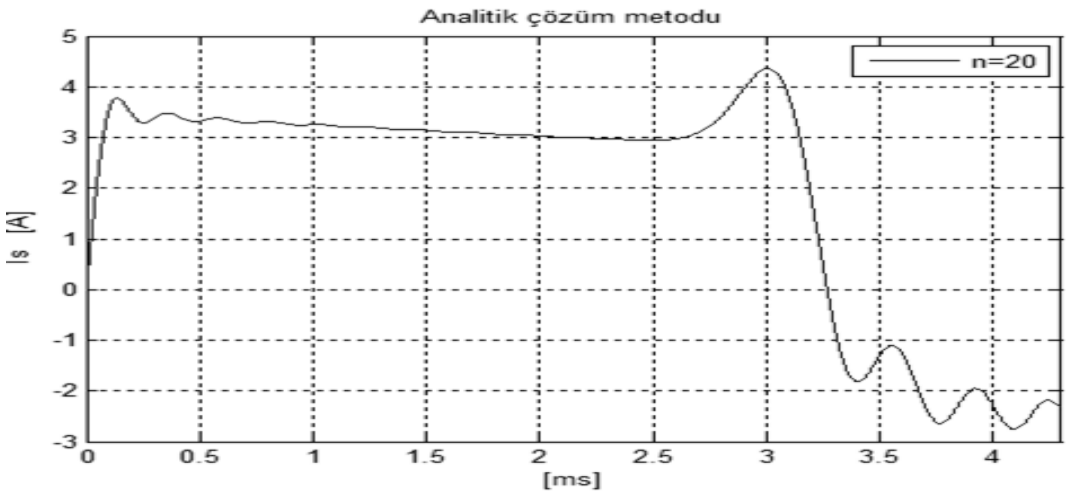
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, kapasitif yükten dolayı yansıyan gerilim dalgası gittikçe artar ve sonuçta yansıma oranı +1 değerine ulaşır. Hat sonuna kapasitif yük bağlanması, çıkış gerilimindeki dalgalanmaları azalttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.40 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.39. Uygulama 4.3 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.40. Uygulama 4.3 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

EMTP-ATP Programı ile elde edilen grafikler, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de gösterilmiştir. Şekil 4.41 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma oranı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

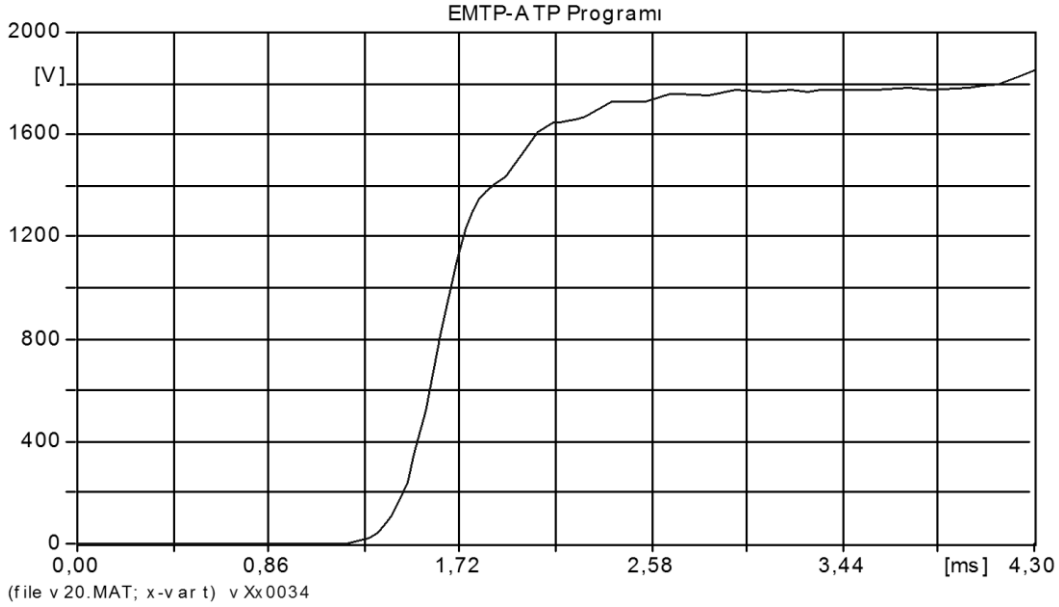
$\Gamma = \frac{u_y}{u_i} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} = 0.991$

$V_r \approx 1800\ V$

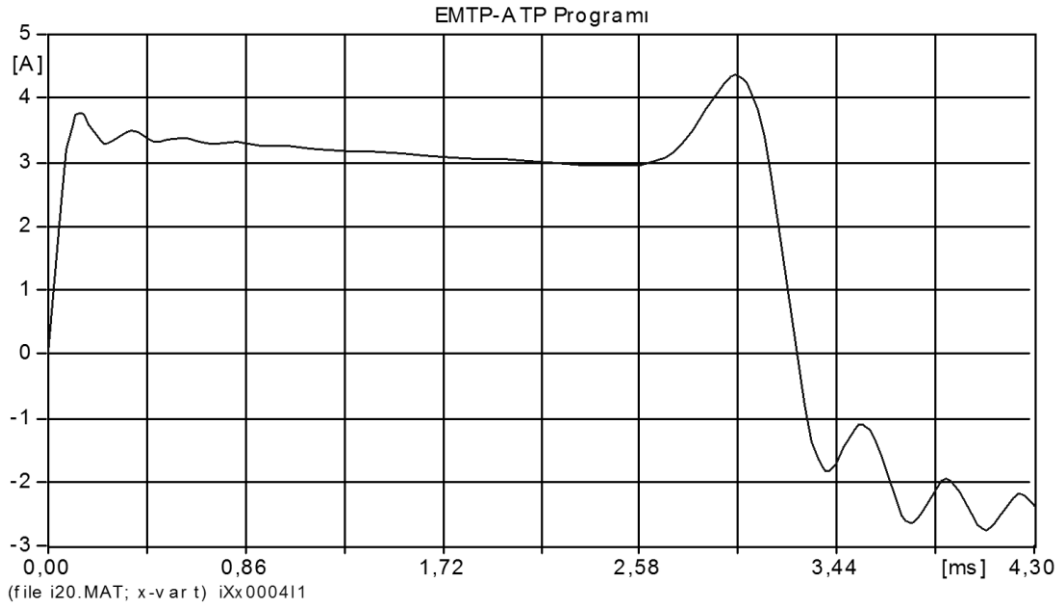
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, kapasitif yükten dolayı yansıyan gerilim dalgası gittikçe artar ve sonuçta yansıma oranı +1 değerine ulaşır. Hat sonuna kapasitif yük bağlanması, çıkış gerilimindeki dalgalanmaları azalttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.42 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.41. Uygulama 4.3 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilimi*

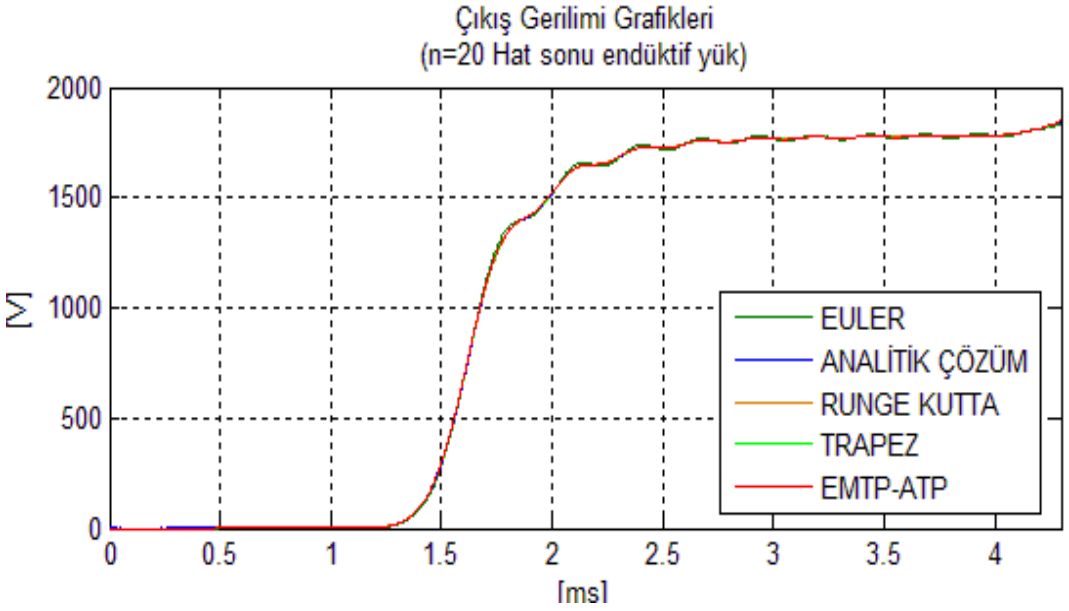



*Şekil 4.42. Uygulama 4.3 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı*

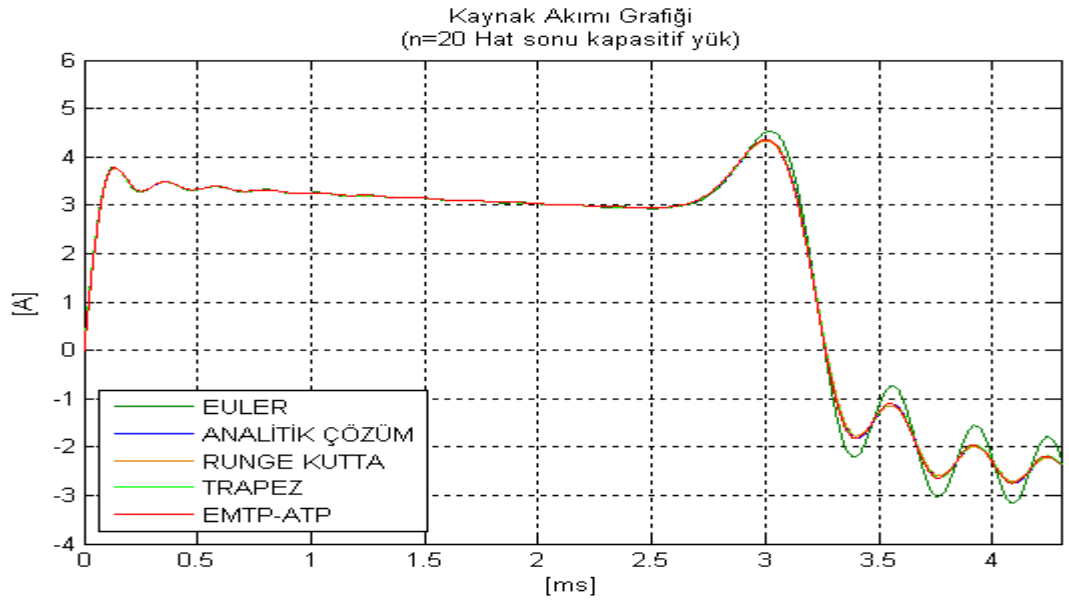
Nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle elde edilen sonuçların doğruluğunu göstermek için akım ve gerilim grafikleri EMTP-ATP programı ile elde edilen sonuçla karşılaştırılmıştır.

$n = 20$ için nümerik integral yöntemleri, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP programından elde edilen hat sonu gerilim ve kaynak akımı grafikleri, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'de gösterilmiştir. Şekil 4.43 ve Şekil 4.44 incelendiğinde; Euler yöntemi hesaplama hassasiyetinde zaman ilerledikçe

azalma meydana geldiği, diğer yöntemlerde belirgin bir sapma olmadığı gözlemlenmiştir.




*Şekil 4.43. Uygulama 4.3'e ait n=20 için hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.44. Uygulama 4.3'e ait n=20 için kaynak akımı*

Sistemin kararlılığı incelenirken, özdeğerlere bakılır. Uygulama 4.3 için A durum matrisinin (Ek.1), c özdeğerler matrisi, Şekil 4.45'de gösterilmiştir.

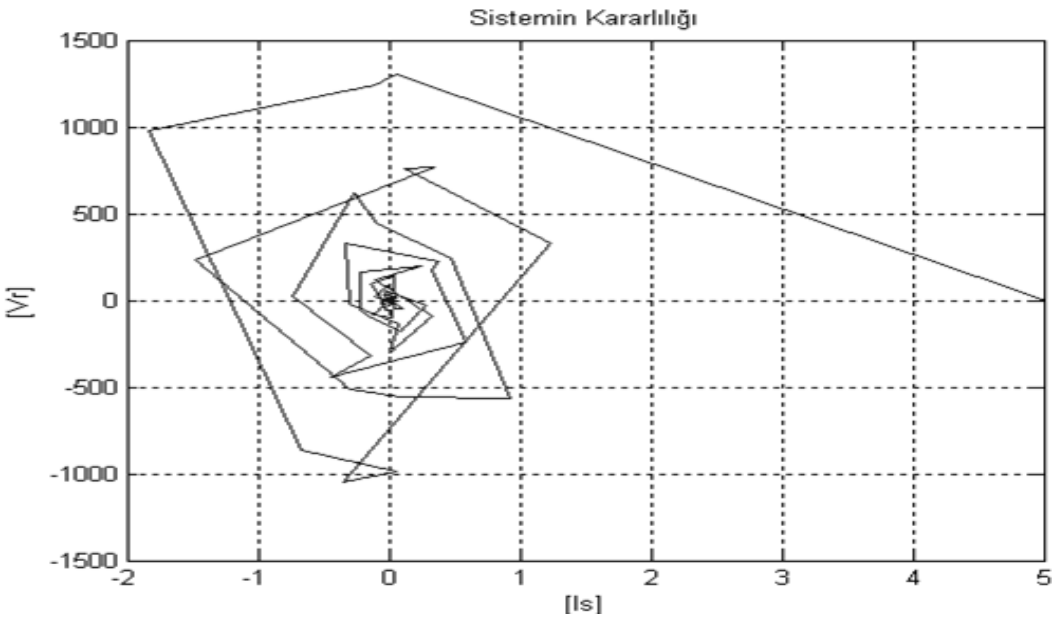
```
n=20

1.0e+004 *

-0.0073 + 2.7807i
-0.0073 - 2.7807i
-0.0073 + 2.7551i
-0.0073 - 2.7551i
-0.0073 + 2.7126i
-0.0073 - 2.7126i
-0.0073 + 2.6536i
-0.0073 - 2.6536i
-0.0073 + 2.5783i
-0.0073 - 2.5783i
-0.0073 + 2.4872i
-0.0073 - 2.4872i
-0.0073 + 2.3809i
-0.0073 - 2.3809i
-0.0073 + 2.2602i
-0.0073 - 2.2602i
-0.0073 + 2.1257i
-0.0073 - 2.1257i
-0.0073 + 1.9783i
-0.0073 - 1.9783i
-0.0073 + 1.8191i
-0.0073 - 1.8191i
-0.0073 + 1.6490i
-0.0073 - 1.6490i
-0.0073 + 1.4692i
-0.0073 - 1.4692i
-0.0073 + 1.2810i
-0.0073 - 1.2810i
-0.0073 + 1.0859i
-0.0073 - 1.0859i
-0.0073 + 0.8856i
-0.0073 - 0.8856i
-0.0073 + 0.0913i
-0.0073 - 0.0913i
-0.0073 + 0.2806i
-0.0073 - 0.2806i
-0.0073 + 0.4791i
-0.0073 - 0.4791i
-0.0073 + 0.6823i
-0.0073 - 0.6823i
```

*Şekil 4.45. Uygulama 4.3'ün A durum matrisinin özdeğerleri*

Şekil 4.45 incelendiğinde; özdeğerlerin reel kısmının negatif bu yüzden, Uygulama 4.3.'deki sistemin asimptotik kararlı olduğu görülmektedir. Ayrıca sistemin öz çözümü de kararlılık hakkında bilgi verir. Yani, dinamik bir sistemi denge noktasına yakın bir yerde başlattığımızda sistem denge noktasına yani sıfıra geri döner. Şekil 4.46'da da sistemin tekrar denge noktasına ulaştığı görülmektedir.




*Şekil 4.46. Uygulama 4.3 kararlılık grafiği*

Uygulama 4.3.'ün analizinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Euler yöntemi, Trapez yöntemi, Runge Kutta yöntemi, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP Programından elde edilen grafikler, Çizelge 4.7'de belirtilen sürede elde edilmiştir.

*Çizelge 4.7. Uygulama 4.3'e ait grafiklerin elde edilme süreleri*

| Kullanılan Yöntem | Hat Sonu Omik Yük Durumu |
|---|---|
| | Geçen Süre (sn) |
| Euler | 7,53 |
| Runge kutta | 7,58 |
| Trapez | 7,70 |
| Analitik | 66540,00 |

- Çizelge 3,7'de verilen süreler içerisinde Euler yöntemi daha hızlı çalışıyor görünmesine rağmen, h $= 1\ \mu s$'den daha büyük adım aralığında sonuç elde edilememiştir.
- Analitik çözüm yöntemiyle, $h = 1\ ms$ adım aralığında bile sonuç elde edilmiştir. Aynı adım aralığında EMTP-ATP programının, analitik çözüm yöntemi kadar hassas olmadığı görülmüştür.
- MATLAB programıyla hazırlanmış olan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemine ait algoritmalardan elde edilen sonuçlar, EMTP-ATP programından

elde edilen sonuçlar kadar hassas ve doğru sonuç vermektedirler. Fakat analitik çözüm yöntemi diğer yöntemlere oranla daha yavaş çalışmaktadır ve $n = 5$ ten büyük bölüm sayısı için MATLAB programı sembolik integral işlemini gerçekleştirememiştir. Bu yüzden integralın sonucu bulunarak algoritmaya yazılmış ve $n = 20$ bölüm için sonuçlar elde edilmiştir.

- Elde edilen grafiklerden, geçici rejim cevabının kritik sönümlü olduğu ve gerilim tepe değerlerinin çok küçük olduğu görülmektedir. İletim hattı sonuna kapasitif yük bağlandığında geçici rejim süresince, gerilimde dalgalanmaların yok olduğu görülmüştür.
- İletim hattı koruyucu teçhizatı ve izolasyon malzemeleri seçilirken bu uygulamada elde edilmiş olan sonuçlardan yararlanılabilir.

**Uygulama 4.4**

Giriş gerilimi $u(t)$ ve hat sonu endüktif yük ($L = 3\ H$) bağlı olan $300\ km$ uzunluğundaki bir iletim hattı, toplu parametreli $n = 20$ devreden oluşmuştur. Bu iletim hattının tahmini hat parametreleri (477 MCM iletkeni için) ve giriş gerilimi;

$u(t) = 1000\ V$
$r = 0.2\ \Omega/km$
$l = 1.37\ mH/km$
$c = 8.37\ nF/km$

şeklindedir.

Bu uygulamada, iletim hattı π modeli baz alınarak, durum uzay teknikleri ile hat sonu gerilimi ve kaynak akımının geçici rejim cevapları analiz edilmiştir. Ayrıca sistemin kararlılığı incelenmiştir.

**Çözüm 4.4**

Bu uygulamada; hat sonu kapasitif yük bağlı olan bir enerji iletim hattına, enerji verilmesi esnasında meydana gelen aşırı gerilim ile aşırı akım dalgalarının iletim hattı izolasyonu ve koruyucu teçhizat üzerindeki etkisini

incelemek, ayrıca nümerik integral ile analitik çözüm yöntemlerinden elde edilen sonuçların doğruluğunu ispatlanması amaçlanmıştır. Öncelikle, toplu parametreli devre sayısı $n = 20$ olan iletim hattının hat parametreleri Çizelge 4.8' de gösterilmiştir.

*Çizelge 4.8. Uygulama 4.4' deki iletim hattına ait hat parametreleri*

| $n = 20$ |
|---|
| $R = 0.2 * 15 = 3\,\Omega$ |
| $L = 1.37 * 15 = 20.5\,mH$ |
| $C = 8.37 * 15 = 12{,}51\,nF$ |

Çizelge 4.8'de verilen hat parametreleri, denklem 3.7'de yerlerine yazılarak, iletim hattının karakteristik empedansı yaklaşık (iletim hattı π modeli için $l = 1.37mH/km, r = 0.2\Omega/km, C = 16.74nF/km$ parametreleri kullanılmıştır),

$$z_0 = \sqrt{\frac{R+jwL}{jwC}} \approx 300\,\Omega$$

olarak elde edilmiştir.

İletim hattı üzerinde ilerleyen gerilim dalgası d uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna $\tau$ süresinde ulaşır. $300\,km$ uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna gerilim dalgasının varma süresi (gecikme süresi),

$$\tau = d\sqrt{LC} = 1.4\,ms$$

olarak elde edilmiştir. Geçici hal esnasında kaynak akımı yaklaşık,

$$I_s = \frac{U_0}{Z_0} \approx 3.33\ \mathrm{A}$$

olarak elde edilmiştir. Denklem 3.27' den gerilim yansıma katsayısı ( $t = 1.4\,ms$ anında),

$$\Gamma = \frac{u_y}{U_0} = u_L - u_i = \left(2.e^{-\frac{t}{T}} - 1\right) = 0.74$$

olarak elde edilmiştir. Fakat bu uygulamada, hattın seri direncinden dolayı gelen gerilim dalgası zayıflayacaktır. $t = 1.4\,ms$ anında, gelen gerilim dalgası, denklem 3.43 kullanılarak yaklaşık,

$$u_i = U_0 e^{-\left(\frac{R}{2Z}\right)vt} = U_0 e^{-t/T} \approx 903\,V$$

olarak bulunmuştur. Bu durumda $\tau$ süresi sonunda hat sonunda yansıyan gerilim dalgası,

$$u_y = 903 * 0.74 = 667\,V$$

olarak elde edilmiştir. Hat sonu gerilimi,

$$V_r = u_i + u_y = 1570\,V$$

olarak bulunmuştur.

Uygulama 4.4'ün durum denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ i_n \\ v_n \\ i_{n+1} \\ v_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & . & . & . & . & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} & . & . & . & . & 0 & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & . & . & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} & . & . & 0 & \vdots & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & 0 & & \\ 0 & \dots & & & & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & & & & 0 & \frac{2}{C} & -\frac{2G}{C} & -\frac{2}{C} & 0 \\ 0 & \dots & & & & & & 0 & \frac{1}{LA} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & & & & & \frac{2}{C} & -\frac{2G}{C} & -\frac{2}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ i_n \\ v_n \\ i_{n+1} \\ v_{n+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \qquad (4.4)$$

MATLAB programı kullanılarak bu uygulamanın geçici hal analizi yapılmıştır. Öncelikle, toplu parametreli devre sayısı $n = 20$ için denklem 4.4 ifadesi, MATLAB programı kullanılarak hazırlanan algoritmayla (Ek.1), sayısal

ortamda kullanılmak üzere elde edilmiştir. Elde edilen durum denklemlerini yine MATLAB programı kullanılarak algoritmaları yazılan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle çözülerek, sistemin geçici rejim cevabı ve kararlılığı incelenmiştir. Bu uygulamada nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleri için adım aralığı $h = 0.000001$ ve zaman aralığı $t = 0 - 0.0043\ sn$ olarak alınmıştır. Sırasıyla Euler, Runge Kutta, Trapez, analitik çözüm yöntemleri ve EMTP-ATP programıyla elde edilen kaynak akımı ve hat sonu gerilimleri elde edilerek grafikler üzerinden gösterilmiştir. Euler yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de gösterilmiştir. Şekil 4.47 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma katsayısı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

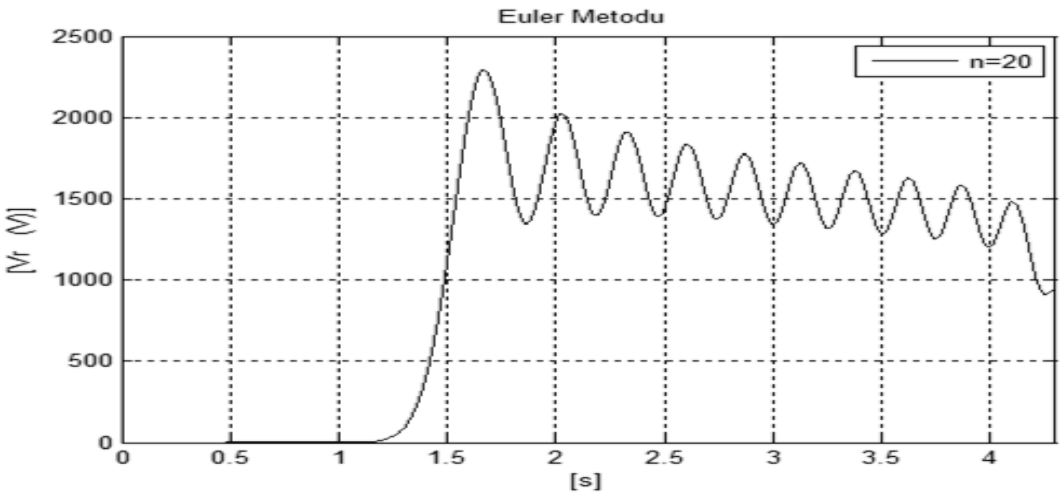
$\Gamma = \frac{u_y}{U_0} = u_L - u_i = \left(2.e^{-\frac{t}{T}} - 1\right) = 0.74$

$V_r = 1570\ V$

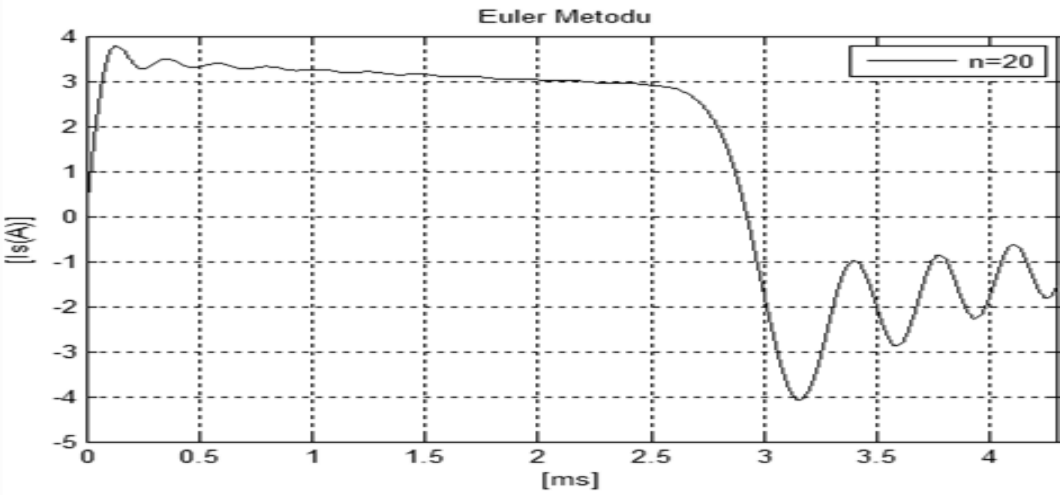
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, endüktansın akıma karşı gösterdiği direncin azalmasıyla birlikte yansıyan gerilimin dalgasının da azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.48 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.47. Uygulama 4.4 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.48. Uygulama 4.4 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Runge Kutta yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de gösterilmiştir. Şekil 4.49 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma katsayısı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

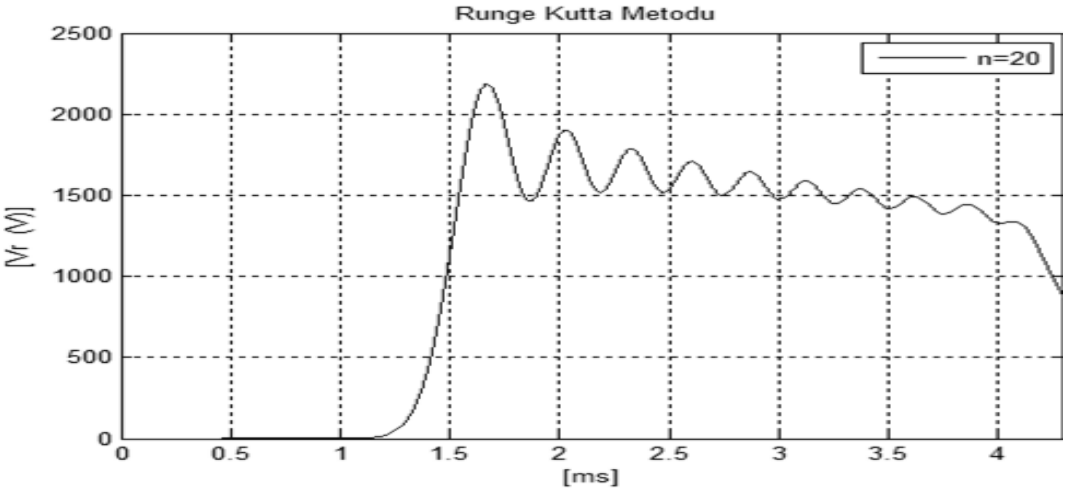
$\Gamma = \frac{u_y}{U_0} = u_L - u_i = \left(2.e^{-\frac{t}{T}} - 1\right) = 0.74$

$V_r = 1570\ V$

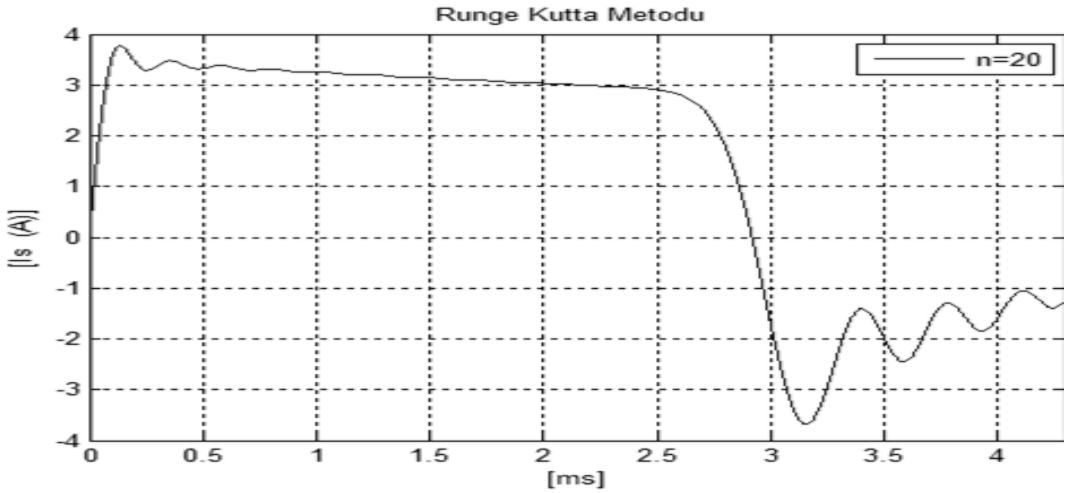
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, endüktansın akıma karşı gösterdiği direncin azalmasıyla birlikte yansıyan gerilimin dalgasının da azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.50 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.49. Uygulama 4.4 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.50. Uygulama 4.4 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Trapez yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.51 ve Şekil 4.52'de gösterilmiştir. Şekil 4.51 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma katsayısı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\,ms$

$\Gamma = \frac{u_y}{U_0} = u_L - u_i = \left(2.e^{-\frac{t}{T}} - 1\right) = 0.74$

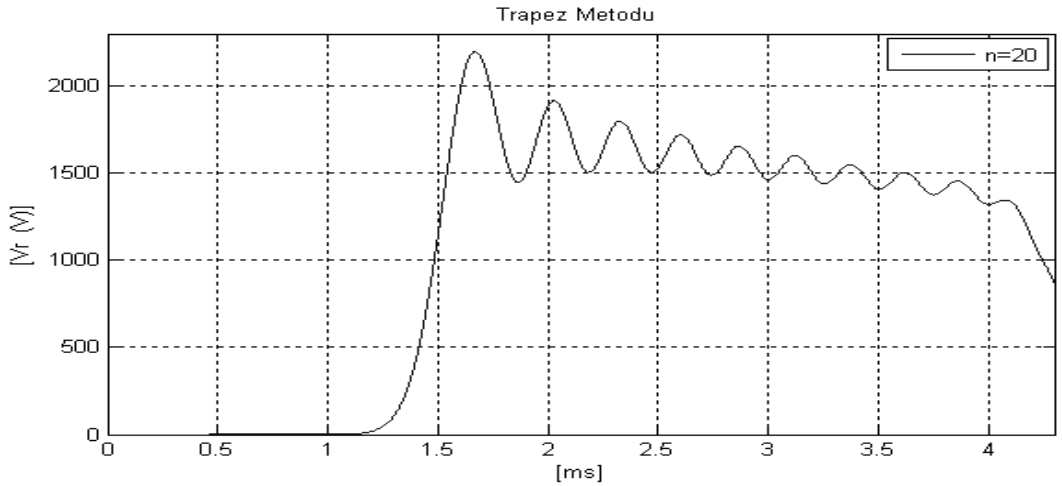
$V_r \approx 1570\,V$

olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, endüktansın akıma karşı gösterdiği

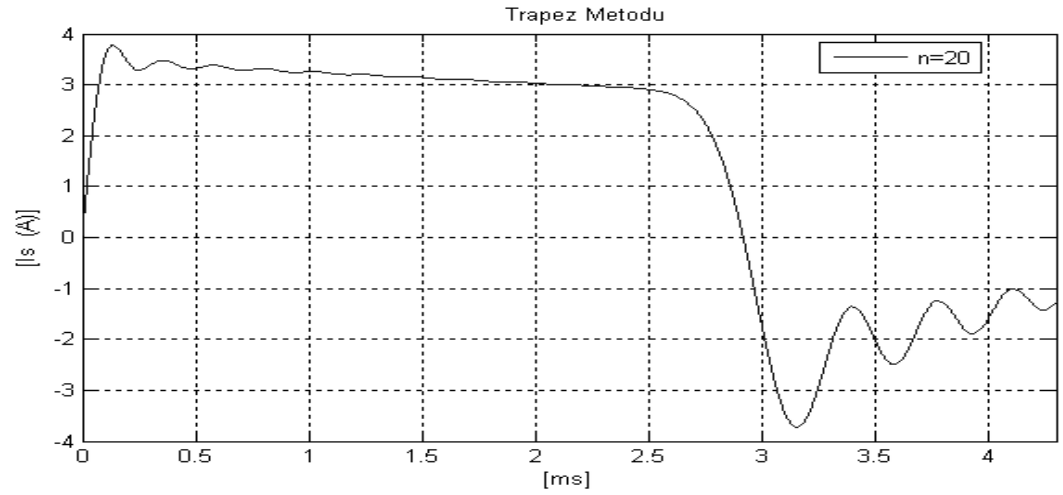
direncin azalmasıyla birlikte yansıyan gerilimin dalgasının da azaldığı gözlemlenmektedir.Şekil 4.52 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.51. Uygulama 4.4 için Trapez yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.52. Uygulama 4.4 için Trapez yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Analitik çözüm yöntemi ile elde edilen grafikler, sırasıyla Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'de gösterilmiştir. Şekil 4.53 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma katsayısı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

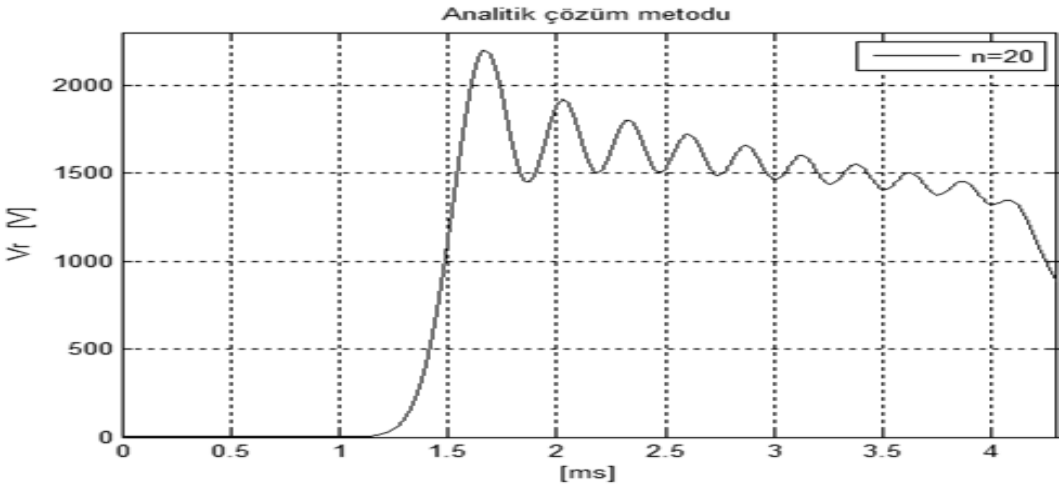
$$\Gamma = \frac{u_y}{U_0} = u_L - u_i = \left(2.e^{-\frac{t}{T}} - 1\right) = 0.74$$

$$V_r \approx 1570\ V$$

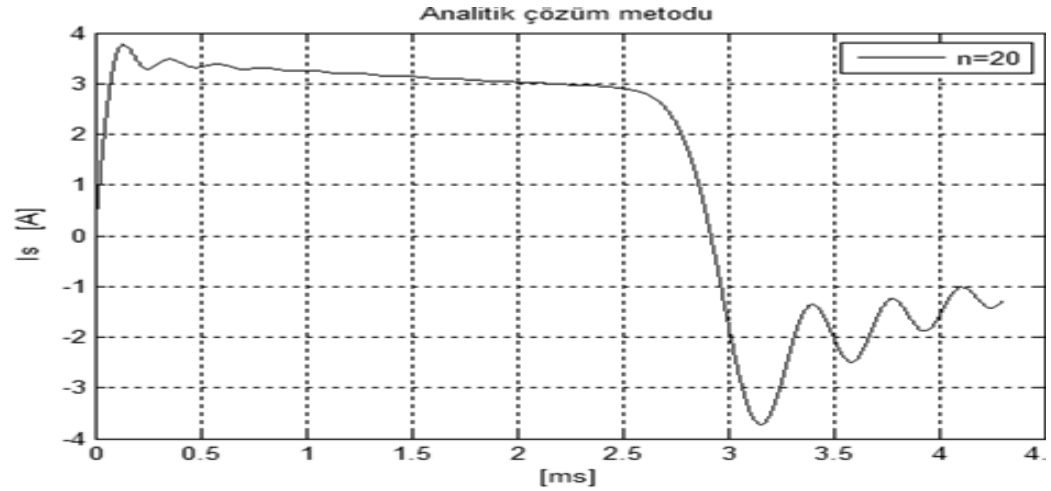
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, endüktansın akıma karşı gösterdiği direncin azalmasıyla birlikte yansıyan gerilimin dalgasının da azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.54 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$$

olduğu görülmektedir.




*Şekil 4.53. Uygulama 4.4 için* analitik çözüm *yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.54. Uygulama 4.4 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

EMTP-ATP Programı ile elde edilen grafikler, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Şekil 4.55 incelendiğinde; gerilim dalgasının gecikme süresi, yansıma katsayısı ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

$\tau = 1.4\ ms$

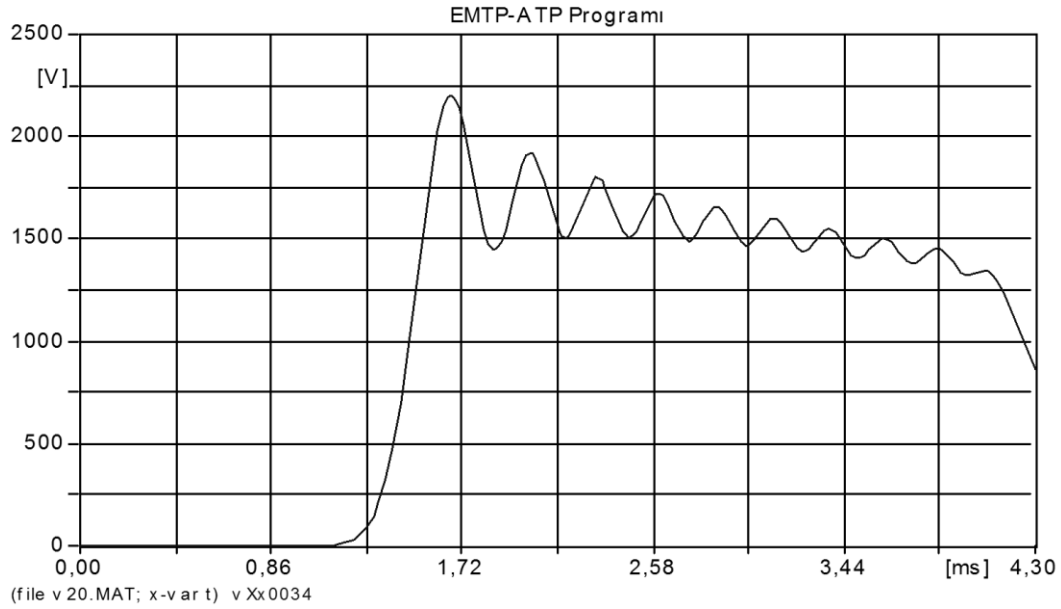
$\Gamma = \frac{u_y}{U_0} = u_L - u_i = \left(2.e^{-\frac{t}{T}} - 1\right) = 0.74$

$V_r \approx 1570\ V$

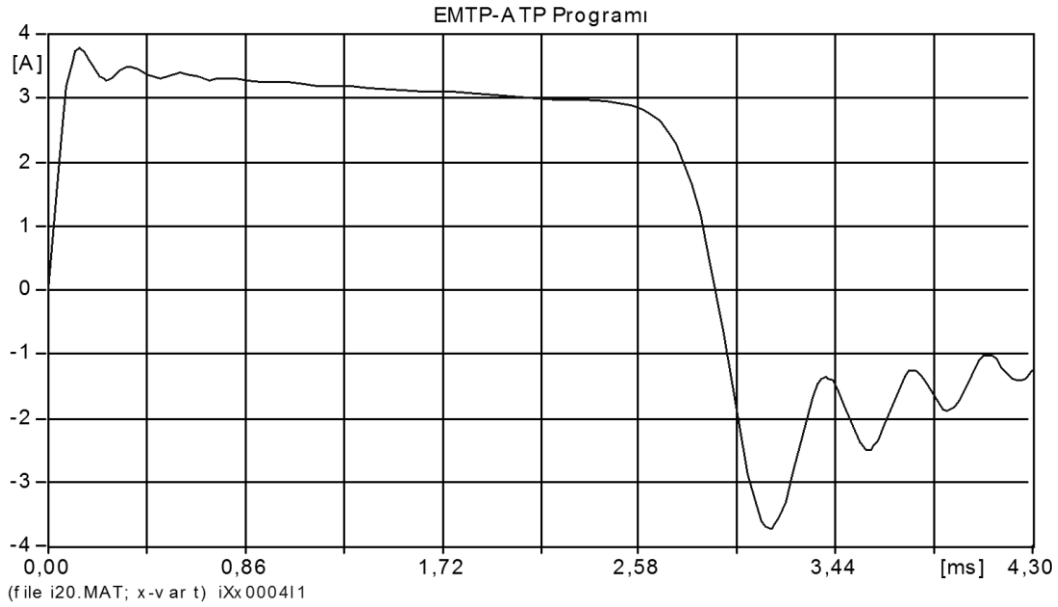
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, endüktansın akıma karşı gösterdiği direncin azalmasıyla birlikte yansıyan gerilimin dalgasının da azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.56 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir.

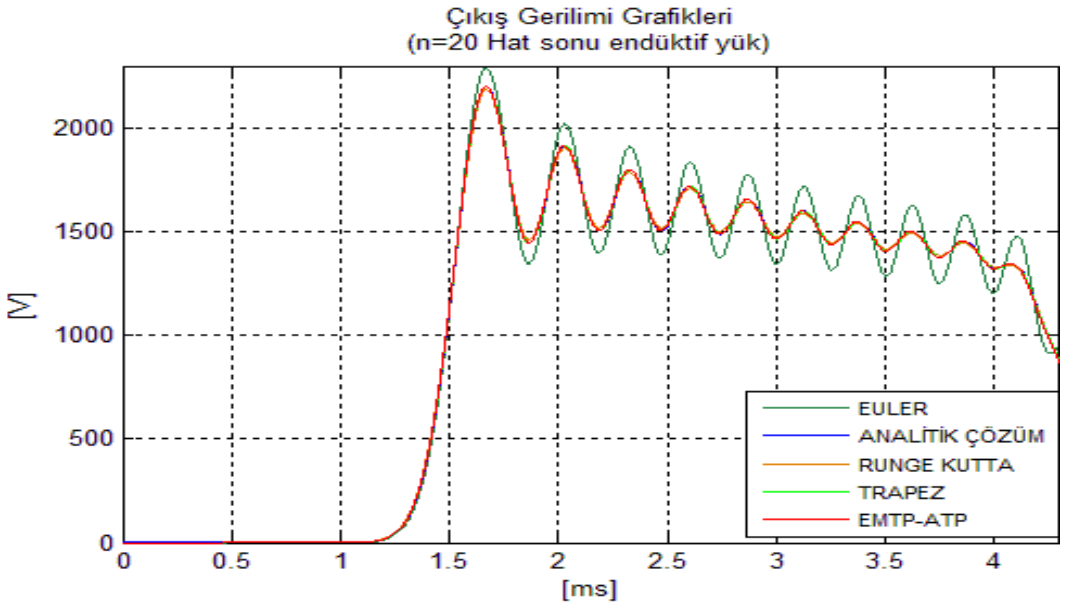



*Şekil 4.55. Uygulama 4.4 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilimi*

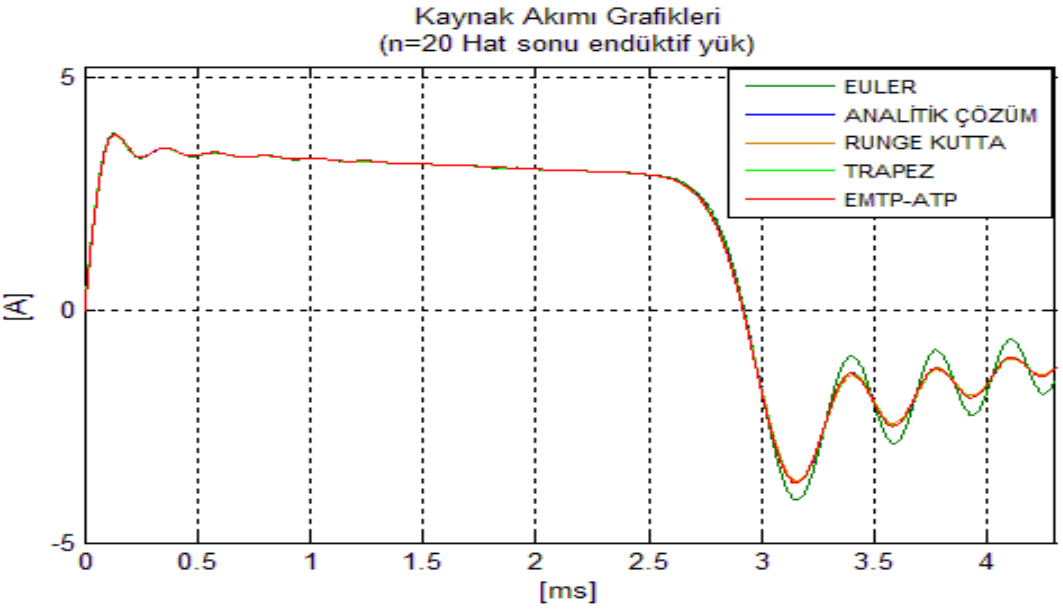



*Şekil 4.56. Uygulama 4.4 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı*

Nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle elde edilen sonuçların doğruluğunu göstermek için akım ve gerilim grafikleri, EMTP-ATP programı ile elde edilen grafiklerle karşılaştırılmıştır. $n = 20$ için nümerik integral yöntemleri, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP programından elde edilen hat sonu gerilim ve kaynak akım grafikleri Şekil 4.57 ve Şekil 4.58'de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, zaman ilerledikçe Euler yöntemi hesaplama hassasiyetinde azalma meydana geldiği, diğer yöntemlerde belirgin bir hata gözlemlenmemektedir.

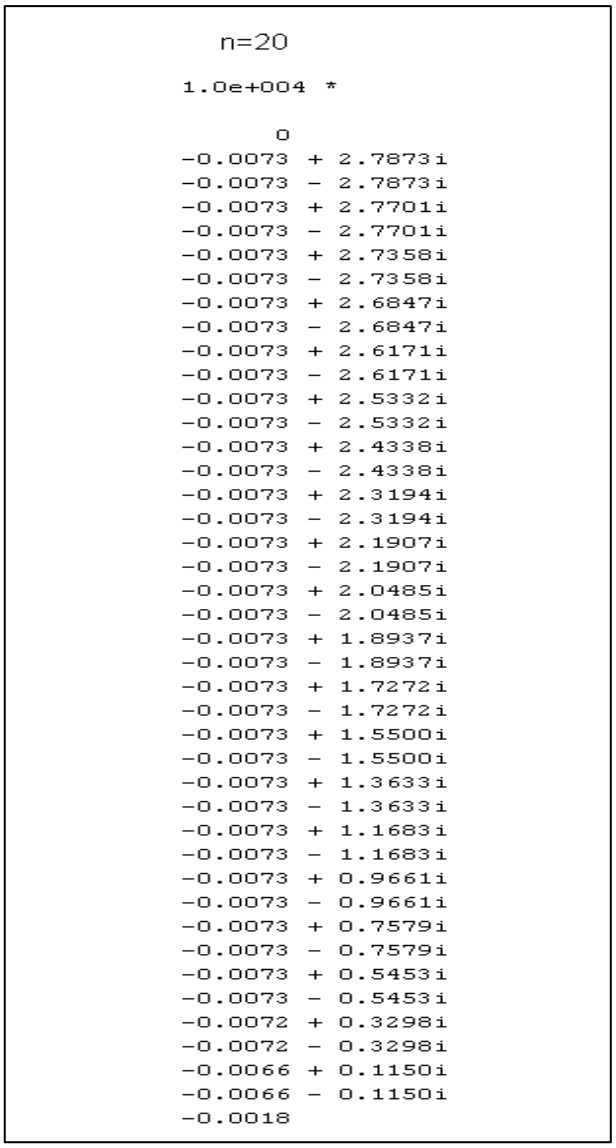



*Şekil 4.57. Uygulama 4.4'e ait n=20 için hat sonu gerilimi*

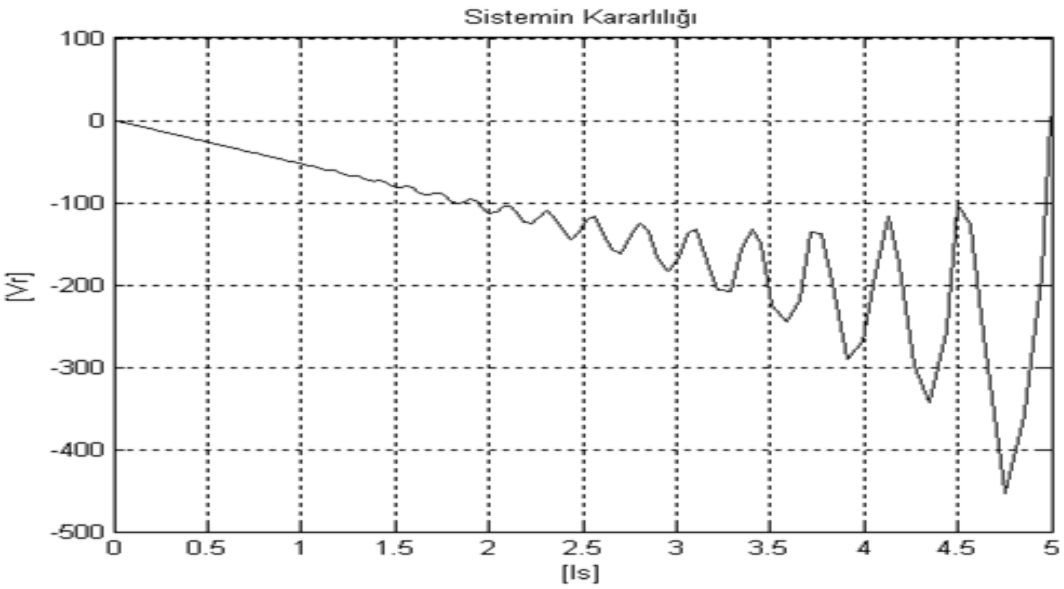



*Şekil 4.58. Uygulama 4.4'e ait n=20 için kaynak akımları*

Sistemin kararlılığını incelerken, sistemin özdeğerlerine bakılmıştır. Uygulama 4.4'nin özdeğerleri Şekil 4.59'da gösterilmiştir. Uygulama 4.4.'e ait devrenin özdeğerlerinin reel kısımları negatif, fakat özdeğerlerden biri sıfır olduğu için sistem kararlıdır. Ayrıca sistemin öz çözümü de kararlılık hakkında bilgi verir. Yani, dinamik bir sistemi denge noktasına yakın bir yerde başlattığımızda sistem denge noktasına yani sıfıra geri döner. Şekil 4.60'da sistemin tekrar denge noktasına döndüğü görülmektedir.




*Şekil 4.59. Uygulama 4.4'ün A durum matrisinin özdeğerleri*




*Şekil 4.60. Uygulama 4.4'ün kararlılık grafiği*

Uygulama 4.4'ün analizinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Euler yöntemi, Trapez yöntemi, Runge Kutta yöntemi, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP Programından elde edilen grafikler, Çizelge 4.9'da belirtilen sürede elde edilmiştir.

*Çizelge 4.9. Uygulama 4.4'e ait grafiklerin elde edilme süreleri*

| **Kullanılan Yöntem** | **Hat sonu omik yük durumu** |
|---|---|
| | **Geçen Süre (sn)** |
| Euler | 7,74 |
| Runge kutta | 7,82 |
| Trapez | 7,70 |
| Analitik | 70010,00 |

- Çizelge 4.9'da verilen süreler içerisinde Euler yöntemi daha hızlı çalışıyor görünmesine rağmen, h $= 1\ \mu s$'den daha büyük adım aralığında sonuç elde edilememiştir.
- Analitik çözüm yöntemiyle, $h = 1\ ms$ adım aralığında bile sonuç elde edilmiştir. Aynı adım aralığında EMTP-ATP programının, analitik çözüm yöntemi kadar hassas olmadığı görülmüştür.
- MATLAB programıyla hazırlanmış olan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemine ait algoritmalardan elde edilen sonuçlar, EMTP-ATP programından

elde edilen sonuçlar kadar hassas ve doğru sonuç vermektedirler. Fakat analitik çözüm yöntemi diğer yöntemlere oranla daha yavaş çalışmaktadır ve $n = 5$ ten büyük bölüm sayısı için MATLAB programı sembolik integral işlemini gerçekleştirememiştir. Bu yüzden integralın sonucu bulunarak algoritmaya yazılmış ve $n = 20$ bölüm için sonuçlar elde edilmiştir.

• Elde edilen grafiklerden, geçici rejim cevabının yavaş sönümlü olduğu ve gerilim tepe değerlerinin oldukça büyük olduğu görülmektedir. İletim hattı bölüm sayısı arttığında gerilim ve akımda dalgalanmaların sayısı artmıştır. İletim hattı koruyucu teçhizatı ve izolasyon malzemeleri seçilirken bu uygulamada elde edilmiş olan sonuçlardan yararlanılabilir.

**Uygulama 4.5**

Giriş gerilimi $u(t)$ ve hat sonu açık devre olan, $300\ km$ uzunluğundaki bir iletim hattı, toplu parametreli $n = 20$ devreden oluşmuştur. Bu iletim hattının tahmini hat parametreleri (477 MCM iletkeni için) ve giriş gerilimi;

$u(t) = 1000\cos(314t)\ V$
$r = 0.2\ \Omega/km$
$l = 1.37\ mH/km$
$c = 8.37\ nF/km$

şeklindedir.

Bu uygulamada, iletim hattı π modeli kullanılarak, durum uzay teknikleri ile hat sonu gerilimi ve kaynak akımının geçici rejim cevapları analiz edilmiştir. Ayrıca sistemin kararlılığı incelenmiştir.

**Çözüm 4.5**

Bu uygulamada; hat sonu kapasitif yük bağlı olan bir enerji iletim hattına, enerji verilmesi esnasında meydana gelen aşırı gerilim ile aşırı akım dalgalarının iletim hattı izolasyonu ve koruyucu teçhizat üzerindeki etkisini

incelemek, ayrıca nümerik integral ile analitik çözüm yöntemlerinden elde edilen sonuçların doğruluğunu ispatlanması amaçlanmıştır.

Öncelikle, toplu parametreli devre sayısı $n = 20$ olan iletim hattına ait hat parametreleri, Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

*Çizelge 4.10. Uygulama 4.5' deki iletim hattına ait parametreler*

| $n = 20$ |
|---|
| $R = 0.2 * 15 = 3\ \Omega$ |
| $L = 1.37 * 15 = 20.5\ mH$ |
| $C = 8.37 * 15 = 12{,}51\ nF$ |

Çizelge 4.10'da verilen hat parametreleri, denklem 3.7'de yerlerine yazılarak, iletim hattının karakteristik empedansı yaklaşık (iletim hattı π modeli için $l = 1.37mH/km, r = 0.2\Omega/km, C = 16.74nF/km$ parametreleri kullanılmıştır),

$$z_0 = \sqrt{\frac{R+jwL}{jwC}} \approx 300\ \Omega$$

olarak elde edilmiştir.

İletim hattı üzerinde ilerleyen gerilim dalgası, d uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna $\tau$ süresinde ulaşır. $300\ km$ uzunluğundaki bir iletim hattının sonuna gerilim dalgasının varma süresi (gecikme süresi),

$$\tau = d\sqrt{LC} = 1.4\ ms$$

olarak elde edilmiştir. Geçici hal esnasında kaynak akımı yaklaşık,

$$I_s = \frac{U_0}{Z_0} \approx 3.33\ \text{A}$$

olarak elde edilmiştir. Hat sonu açık devre olduğundan gelen dalganın tamamı yansıyacaktır, yani yansıma katsayısı (kayıpsız bir hat için),

$$\Gamma = +1$$

olarak elde edilmiştir. Fakat bu uygulamada, hattın seri direncinden dolayı gelen gerilim dalgası zayıflayacaktır. Gerilim dalgasının hat sonuna varma süresinde, yani $t = 1.4\,ms$ esnasında gelen gerilim dalgası, denklem 3.43 kullanılarak yaklaşık,

$$u_i = U_0 e^{-\left(\frac{R}{2Z}\right)vt} = U_0 e^{-t/T} = 816\,V$$

olarak bulunmuştur. Bu durumda $\tau$ süresi sonunda hat sununda yansıyan gerilim dalgası,

$$u_y = 816\,V$$

olarak elde edilmiştir. Hat sonu gerilimi,

$$V_r = u_i + u_y = 1632\,V$$

olarak elde edilmiştir.

Uygulama 4.5 için durum denklemleri olarak denklem 4.1 kullanılmıştır. MATLAB programı kullanılarak bu uygulamanın geçici hal analizi yapılmıştır. Öncelikle, toplu parametreli devre sayısı $n = 20$ için denklem 4.1 ifadesi, MATLAB programı kullanılarak hazırlanan algoritmayla (Ek.1), sayısal ortamda kullanılmak üzere elde edilmiştir. Elde edilen durum denklemlerini yine MATLAB programı kullanılarak algoritmaları yazılan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle çözülerek, sistemin geçici rejim cevabı ve kararlılığı incelenmiştir.

Bu uygulamada nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleri için adım aralığı $h = 0.000001$ ve zaman aralığı $t = 0 - 0.0043\,sn$ olarak alınmıştır. Sırasıyla Euler, Runge Kutta, Trapez, analitik çözüm yöntemleri ve EMTP-ATP programıyla elde edilen kaynak akımı ve hat sonu gerilimleri bulunmuş ve grafiklerle gösterilmiştir. Euler yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.61 ve Şekil 4.62'de gösterilmiştir. Şekil 4.61 incelendiğinde; gecikme süresi ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

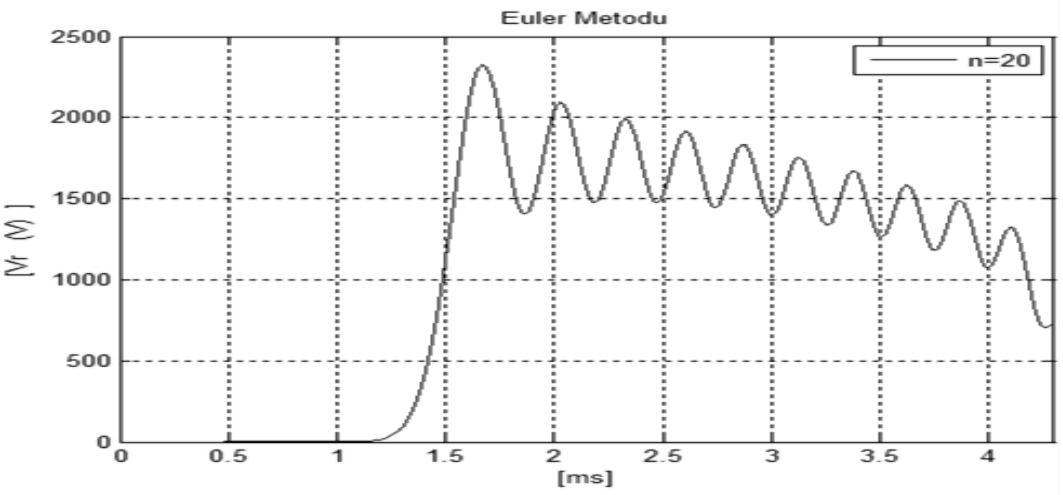
$$\tau = 1.4\,ms$$

$V_r \approx 1630\ V$

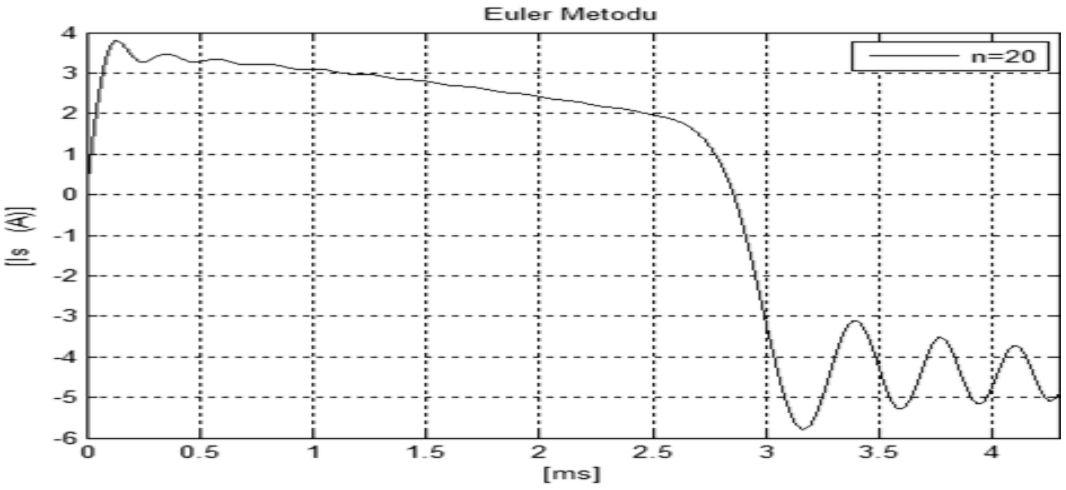
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, sinüzoidal dalganın değeri azaldığından, hat sonu geriliminin de azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4. 62 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe sinüzoidal gerilim azaldığından, kaynak akımının da azaldığı gözlenmektedir.




*Şekil 4.61. Uygulama 4.5 için Euler yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.62. Uygulama 4.5 için Euler yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Runge Kutta yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.63 ve Şekil 4.64'de gösterilmiştir. Şekil 4.63 incelendiğinde; gecikme süresi ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

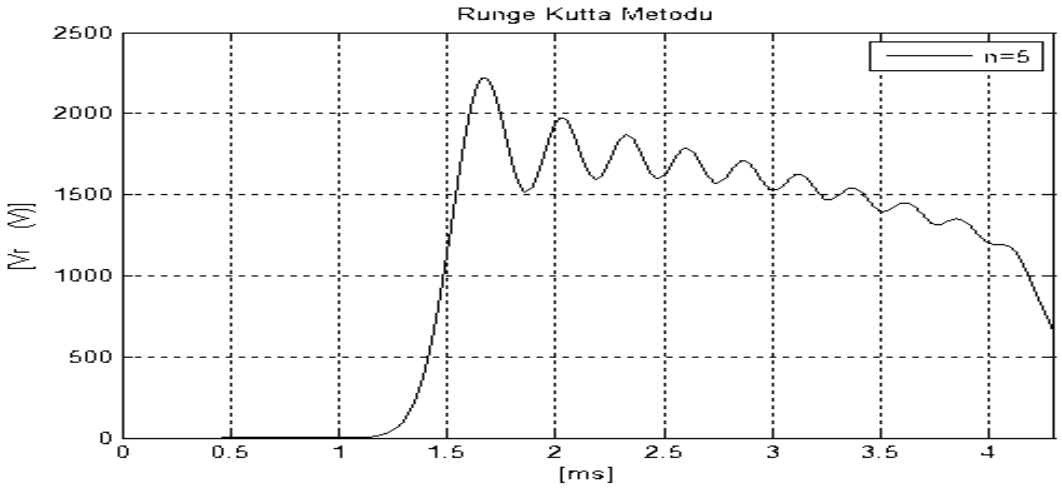
$\tau = 1.4\, ms$

$V_r \approx 1630\, V$

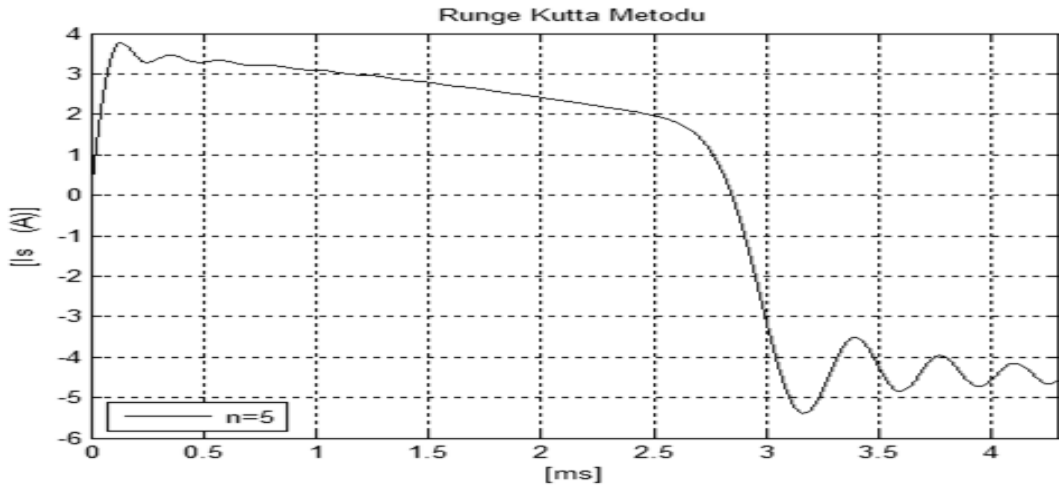
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, sinüzoidal dalganın değeri azaldığından, hat sonu geriliminin de azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4. 64 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe sinüzoidal gerilim azaldığından, kaynak akımının da azaldığı gözlenmektedir.




*Şekil 4.63. Uygulama 4.5 için Runge Kutta yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.64. Uygulama 4.5 için* Runge Kutta *yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Trapez yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.65 ve Şekil 4.66'da gösterilmiştir. Şekil 4.65 incelendiğinde; gecikme süresi ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

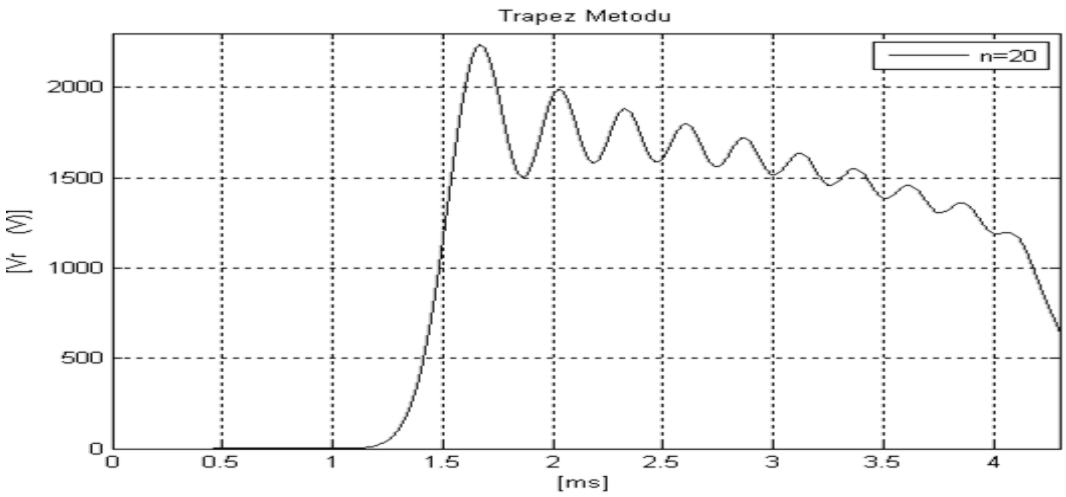
$\tau = 1.4\, ms$

$V_r \approx 1630\, V$

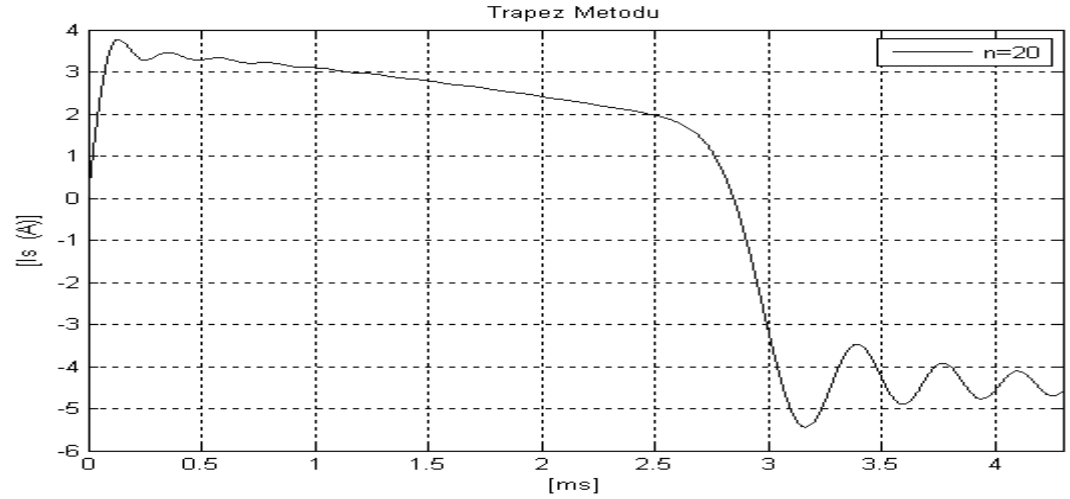
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, sinüzoidal dalganın değeri azaldığından, hat sonu geriliminin de azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4. 66 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe sinüzoidal gerilim azaldığından, kaynak akımının da azaldığı gözlenmektedir.




*Şekil 4.65. Uygulama 4.5 için Trapez yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.66. Uygulama 4.5 için Trapez yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

Analitik çözüm yöntemi ile elde edilen grafikler, Şekil 4.67 ve Şekil 4.68'de gösterilmiştir. Şekil 4.67 incelendiğinde; gecikme süresi ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

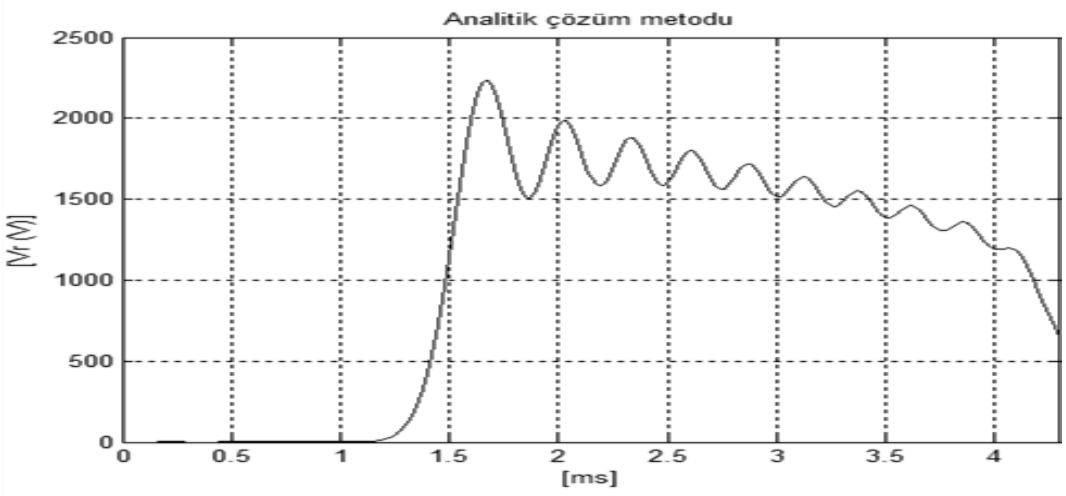
$\tau = 1.4\, ms$

$V_r \approx 1630\, V$

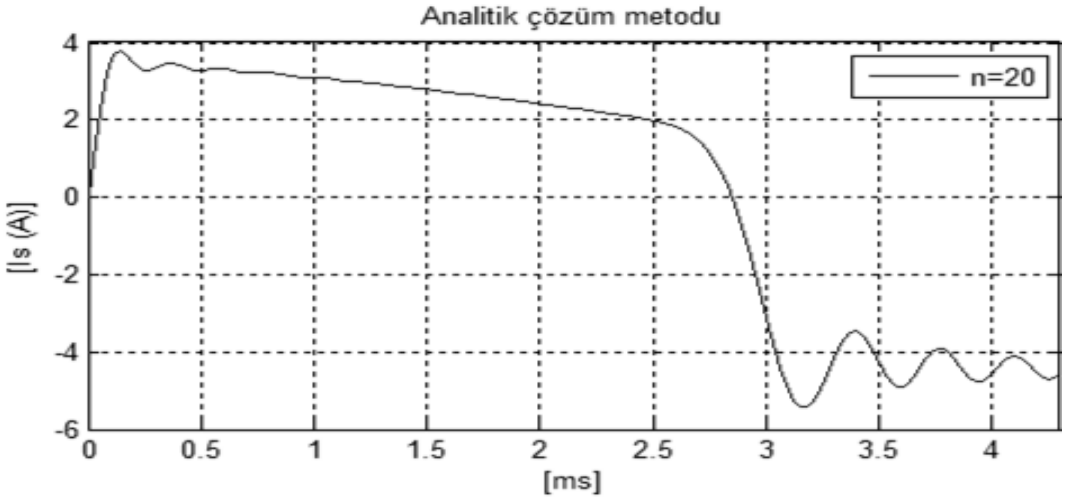
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, sinüzoidal dalganın değeri azaldığından, hat sonu geriliminin de azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4. 68 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$

olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe sinüzoidal gerilim azaldığından, kaynak akımının da azaldığı gözlenmektedir.




*Şekil 4.67. Uygulama 4.5 için analitik çözüm yöntemi ile elde edilen hat sonu gerilimi*




*Şekil 4.68. Uygulama 4.5 analitik çözüm yöntemi ile elde edilen kaynak akımı*

EMTP-ATP Programı ile elde edilen grafikler, Şekil 4.69 ve Şekil 4.70'te gösterilmiştir. Şekil 4.69 incelendiğinde; gecikme süresi ve yaklaşık olarak hat sonu geriliminin,

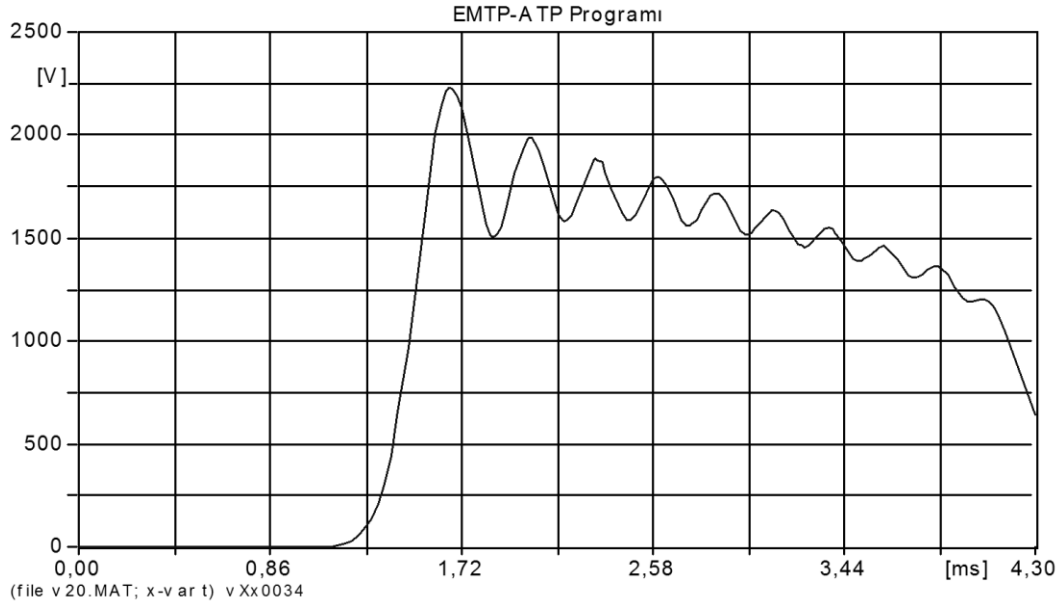
$\tau = 1.4\ ms$

$V_r \approx 1630\ V$

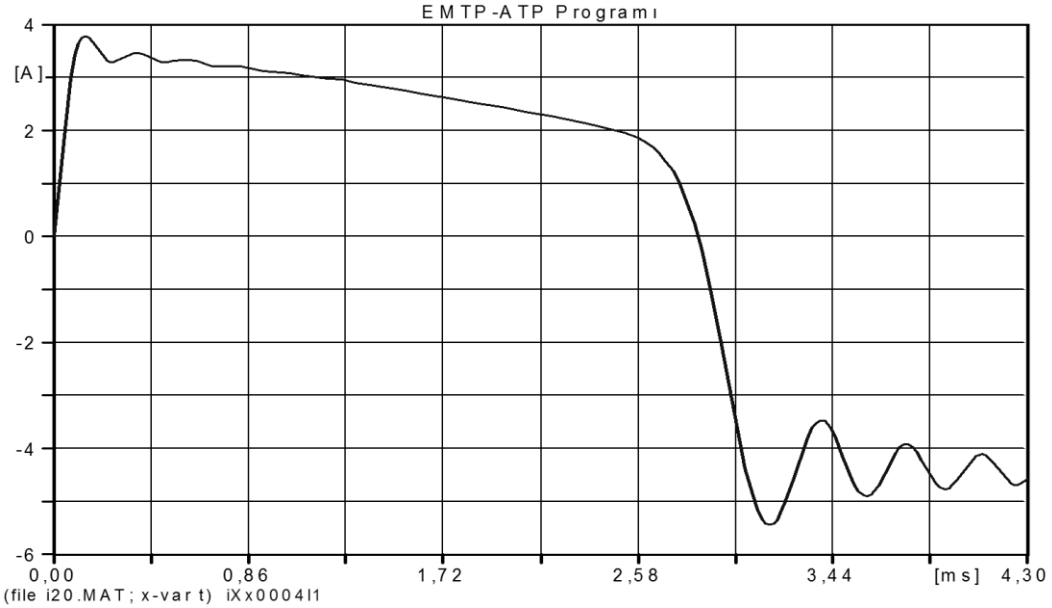
olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe, sinüzoidal dalganın değeri azaldığından, hat sonu geriliminin de azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4. 70 incelendiğinde; kaynak akımının yaklaşık,

$$I_s \approx 3.33\ \mathrm{A}$$

olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe sinüzoidal gerilim azaldığından, kaynak akımının da azaldığı gözlenmektedir.

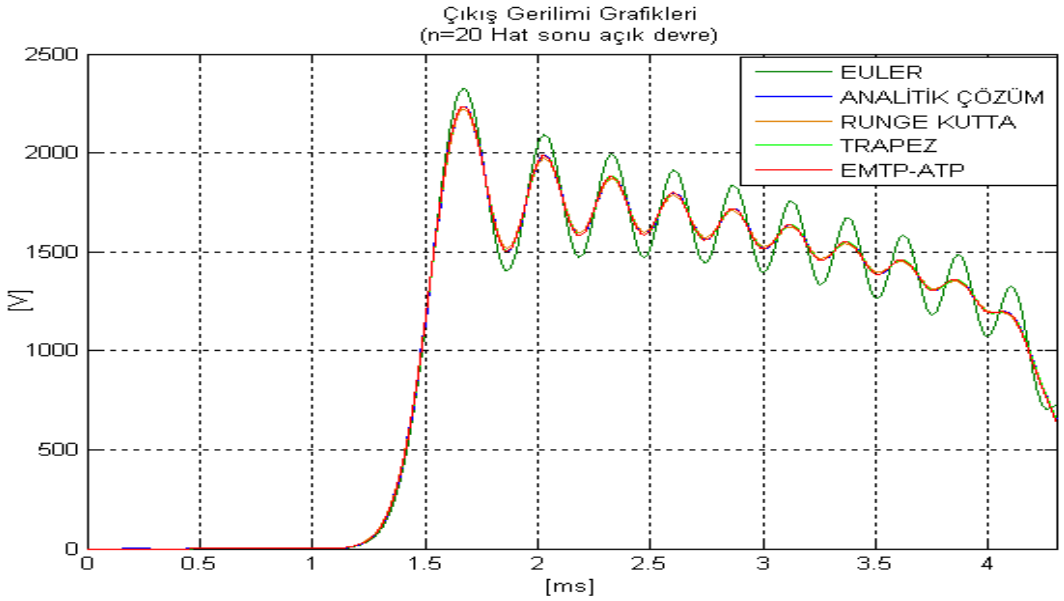



*Şekil 4.69. Uygulama 4.4 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen hat sonu gerilimi*

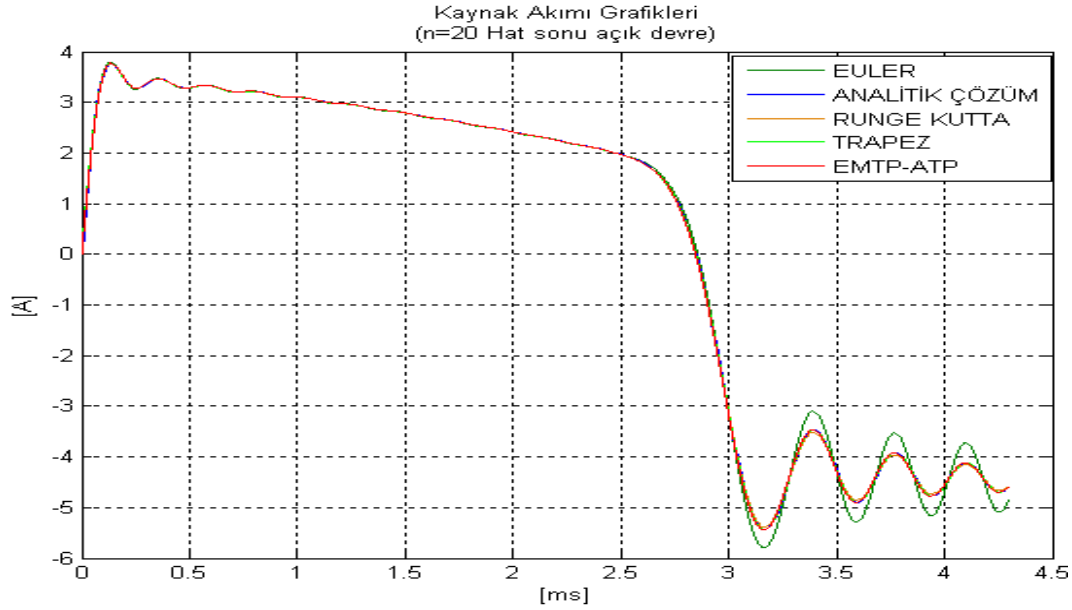



*Şekil 4.70. Uygulama 4.5 için EMTP-ATP Programı ile elde edilen kaynak akımı*

Nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle elde edilen sonuçların doğruluğunu göstermek için akım ve gerilim grafikleri, EMTP-ATP programı ile elde edilen sonuçla karşılaştırılmıştır. $n = 20$ için nümerik integral yöntemleri, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP programından elde edilen hat sonu gerilim ve kaynak akım grafikleri Şekil 4.71 ve Şekil 4.72'de gösterilmiştir. Şekil 4.71 ve Şekil 4.72 incelendiğinde; zaman ilerledikçe Euler yöntemi hesaplama hassasiyetinde azalma meydana geldiği, diğer yöntemlerde herhangi bir sapma olmadığı görülmüştür.

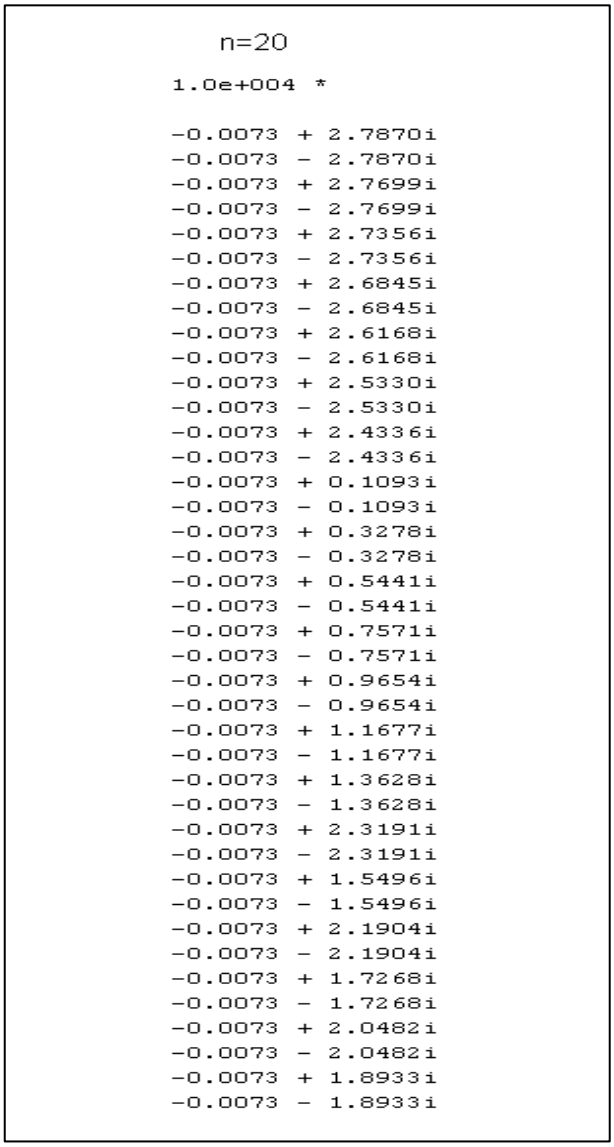



*Şekil 4.71. Uygulama 4.5'e ait n=20 için hat sonu gerilimi*

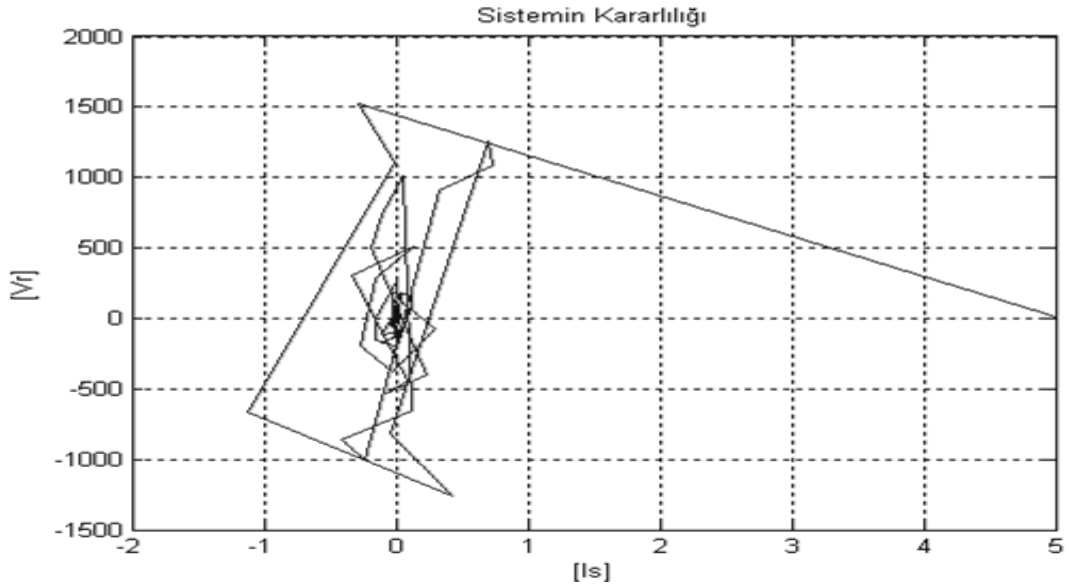



*Şekil 4.72. Uygulama 4.5'e ait n=20 için kaynak akımları*

Sistemin kararlılığını incelerken, sistemin özdeğerlerine bakılmıştır. Eğer özdeğerlerin reel kısmı negatif ise sistem asimptotik kararlıdır. Uygulama 4.5'in özdeğerleri, Şekil 4.73 de gösterilmiştir. Özdeğerlerin reel kısmı negatiftir, bu yüzden sistem asimptotik kararlıdır. Ayrıca çıkışa ait akım ve gerilim grafiği de kararlılık hakkında bilgi verir. Yani, dinamik bir sistemi denge noktasına yakın bir yerde başlattığımızda sistem denge noktasına yani sıfıra geri döner. Şekil 4.74'de sistemin tekrar denge noktasına döndüğü görülmektedir.




*Şekil 4.73. Uygulama 4.5"e ait devrenin özdeğerleri*




*Şekil 4.74. Uygulama 4.5.in kararlılık grafiği*

Uygulama 4.5.'in analizinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

• Euler yöntemi, Trapez yöntemi, Runge Kutta yöntemi, analitik çözüm yöntemi ve EMTP-ATP Programından elde edilen grafikler, Çizelge 4.11'de belirtilen sürede elde edilmiştir.

*Çizelge 4.11. Uygulama 4.5'e ait grafiklerin elde edilme süreleri*

| **Kullanılan Yöntem** | **Hat sonu açık devre** |
|---|---|
| | **Geçen Süre (sn)** |
| Euler | 9,5 |
| Runge kutta | 12,2 |
| Trapez | 19,2 |
| Analitik | 72430 |

• Çizelge 4.11'de verilen süreler içerisinde Euler yöntemi daha hızlı çalışıyor görünmesine rağmen, $h = 1\,\mu s$'den daha büyük adım aralığında sonuç elde edilememiştir.

• Analitik çözüm yöntemiyle, $h = 1\,ms$ adım aralığında bile sonuç elde edilmiştir. Aynı adım aralığında EMTP-ATP programının, analitik çözüm yöntemi kadar hassas olmadığı görülmüştür.

• MATLAB programıyla hazırlanmış olan nümerik integral ve analitik çözüm yöntemine ait algoritmalardan elde edilen sonuçlar, EMTP-ATP programından

elde edilen sonuçlar kadar hassas ve doğru sonuç vermektedirler. Fakat analitik çözüm yöntemi diğer yöntemlere oranla daha yavaş çalışmaktadır ve $n = 5$ ten büyük bölüm sayısı için MATLAB programı sembolik integral işlemini gerçekleştirememiştir. Bu yüzden integralın sonucu algoritmaya yazılmış ve $n = 20$ bölüm için sonuçlar elde edilmiştir.

• Elde edilen grafiklerden, geçici rejim cevabının yavaş sönümlü olduğu ve gerilim tepe değerlerinin oldukça büyük olduğu görülmektedir. İletim hattı bölüm sayısı arttığında gerilim ve akımda dalgalanmaların sayısı artmıştır. İletim hattı koruyucu teçhizatı ve izolasyon malzemeleri seçilirken bu uygulamada elde edilmiş olan sonuçlardan yararlanılabilir.

### 4.2. Sonuç

Bu çalışmada, güç sistemleri durum uzay teknikleriyle incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

• Bu çalışmada güç sistemleri analizi yapılırken durum denklemleri kullanıldı. Analitik çözüm yöntemi ve nümerik yöntemlerle, elde edilen bu durum denklemlerinin analizi, bilgisayar ortamında yapıldı ve sistemin karalılığı incelendi. Elde edilen sonuçlar, EMTP-ATP programıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı ve hazırlanan algoritmaların çok iyi çalıştığı gözlemlendi.

• İletim hattı kararlılığı incelenirken, A durum matrisinin özdeğerlerinden yararlanıldı. Özdeğerlerin gerçek kısmına bakılarak hattın kararlı olup olmadığı gözlendi ve kararlılık grafiği çizdirildi.

Durum denklemlerinden yararlanılarak, elde edilen özdeğerlerin reel kısmının işaretine bakarak, geçici rejim olaylarında oluşan dalgaların sönüm durumu incelendi.

• Geçici rejim analizi; sistemlere monte edilecek koruyucu malzemelerin cinsi, izolasyonu, çalışma aralığı tespiti ve iletkenin cinsi seçiminde büyük önem taşıdığından, gerilim ve akım dalgalarının tepe değerleri ve süreleri elde edilmiştir.

• Durum uzay teknikleri, bilgisayar algoritmasını hazırlarken büyük kolaylıklar sağlamış ve denklemler matris formunda olduğundan, bilgisayar hesaplama performansına pozitif katkı sağladığı görülmüştür.

- Nümerik integral yöntemlerinin analitik çözüm yöntemine göre daha hızlı çalıştıkları gözlendi. Bu analitik çözüm yönteminin sembolik değerler içermesinden kaynaklanmaktadır. En hassas sonuç analitik çözüm yöntemiyle elde edilmiş olmasına rağmen, formüllerden kaynaklanan sembolik integral işleminde MATLAB programının yetersiz olduğu bu yüzden $n = 10$ ve $n = 20$ bölümden oluşan iletim hatları için analitik yöntem denklemindeki (denklem 3.93) integral sonucu bulunmuş ve algoritmada yerine yazılarak sonuçlar elde edilmiştir.
- Nümerik integral ve analitik çözüm yöntemleriyle analiz edilen güç sistemi, EMTP-ATP programıyla da toplu parametre yaklaşımıyla analiz edilmiştir. Hat sonu gerilim ve kaynak akımı değerleri aynı hassasiyet ve doğrulukta elde edilmiştir.
- Nümerik analiz yöntemleriyle durum denklemleri çözüldüğünde, çözüm için alınan $h$ (adım aralığı) ne kadar küçük seçilirse hata payının aynı şekilde azaldığı görülmüştür. Euler yöntemi diğer yöntemlere göre daha hızlı çalışmasına rağmen $h = 1\,\mu s$ adım aralığından daha büyük adım aralığında sonuç elde edilememiştir.
- İletim hattı geçici rejim analizi yaparken, iletim hattı bölüm sayısının artması s bölüm kapasite değerini düşürmüştür. Bunun sonucunda gerilim ve akımın geçici rejim periyotları ve bu dalgaların tepe değerleri azalmıştır. Aynı zamanda bu durumun dalgaların etki zamanının azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Y. Uyaroglu, “Yeraltı enerji kablolarında kapama asırı gerilimlerinin geçici rejim analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi,1997.
[2] İ. Eker, “Havai nakil hatlarının devre analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, 1991.
[3] M. S. Mamiş, “İletim hatlarinda meydana gelen aşırı gerilimlerin uzay-durum denklemleri kullanılarak çözümü”, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, 1992.
[4] E. Erçelebi,“Enerji sistemlerinde meydana gelen yıldırım aşırı gerilimlerin etüdü“, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, 1992.
[5] M. S. Mamiş, ” Çok fazlı enerji iletim hatlarının durum uzayı tekniği ile sürekli ve geçici hal analizi”, Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi, 1997.
[6] Y. C. Evrenesoğlu “Elektrik güç sisteminin ayrıntılı modeli ile geçici kararlılık çözümlemesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2000.
[7] V. Doğruer. “Elektrik Güç sistemlerinde MATLAB Simulink ile Kısa Devre Analizi ve Bir Örnek Olarak Van Enerji Nakil Hattının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, 2007.
[8] S. Koç, “Enerji İletim Hatlar İçin MATLAB/GUI Tabanlı Bir Arıza Analiz Programı Geliştirme”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, 2008.
[9] H. Çakır, Elektrik Güç Sistemleri Analizi, Yıldız üniversitesi mühendislik fakültesi, 1986, s:1
[10] H. Karakurt, “İletim Hatları”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2006.
[11] M. Özkaya, Yüksek Gerilim Tekniği Cilt-2, Birsen Yayınları, 2005, s:53
[12] M. S. Mamiş, M.E. Meral, *Prafudurun geçici rejim altındaki davranışının incelenmesi*, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi
[13] Ş. Özbey, Elektrik Devre Analizi-1-, Şeçkin Yayınları, Kasım 2009, s:140
[14] A. Ünal, S. Özenç, Çözümlü Elektrik Devre Problemleri, Birsen Yayınevi, 2006, s: 2
[15] İ. Uzun, Nümerik Analiz, BETA Yayınları,2004, s:303
[16] E. Can, E.S. Türker, Bilgisayar uygulamalı Sayısal analiz yöntemleri, Değişim yayınları, s:329
[17] F. Scheid, Nümerik Analiz Teori ve Problemleri, Nobel Yayınları,1988,s:205
[18] M. S. Mamiş, ” Discrete-time state-space modeling of distributed parameter transmission line” EUROCON 2007 The International Conference on “Computer as a Tool” Warsaw, September 9-12
[19] Y. Tokad, Devre analizi dersleri kısım-4, Çağlayan Kitabevi, s:18
[20] U. Arifoğlu, Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi, Alfa Yayınları, Ocak 2002, s:384
[21] A. Demirören, L. Zeynelgil, Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması, Birsen Yayınevi, 2004, s: 90
[22] The MATLAB Users Guide, www.mathworks.com
[23] ATPDraw for Windows 3.1 User’s Manual; Lázló Prikler, Hans Kr. Høidalen; 1998.
[24] M. S. Mamiş, **“**State-Space Transient Analysis of Single Phase Transmission Lines with Corona”, International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA.

# 6. EKLER

## Ek.1. İletim hattı durum denklemleri, nümerik integral ve analitik çözüm yöntemi kodları CD

# ÖZGEÇMİŞ

01.01.1978 yılında Malatya'da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya'da tamamladım. 1996 yılında İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği bölümünde başladığım lisans öğrenimini 2000 yılında bitirdim. 2000-2007 yılları arasında özel şirketlerde elektrik mühendisi olarak çalıştım. 2007 yılında Fırat EDAŞ Malatya İl Müdürlüğünde elektrik mühendisi olarak işe başladım. 2008 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladım. Halen aynı kurumunda çalışmaya devam etmekteyim.