

Geliş Tarihi : 08/06/2026
Kabul Tarihi : 18/06/2026

Received Date : 08/06/2026
Accepted Date : 18/06/2026

GÜÇ SİSTEMLERİ GEÇİCİ REJİM SİMÜLASYONLARINDA ZAMAN ADIM UZUNLUĞU ETKİSİNİN İNCELENMESİ

AN ANALYSIS OF THE EFFECT OF TIME STEP LENGTH IN TRANSIENT SIMULATIONS OF POWER SYSTEMS

İlker ARI^{1*} (ORCID: 0000-0002-4133-4344)
M. Salih MAMİŞ² (ORCID: 0000-0001-5644-4178)

¹Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Siirt, Türkiye
²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İlker ARI

Öz

Güç sistemlerinde yıldırım düşmesi gibi yüksek frekanslı geçici rejim olaylarının simülasyonu, ekipman güvenliği ve koruma sistemi tasarımı için hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada, geçici rejim analizlerinin doğruluğunu belirleyen en kritik parametrelerden biri olan zaman adım uzunluğunun (Δt) sonuçlar üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, 300 km uzunluğunda dağıtık parametrelili bir iletim hattı, Heidler modeli ile temsil edilen bir yıldırım darbesi ve 10 diskten oluşan merdiven ağı tipi bir güç transformatörü modeli kullanılarak karmaşık bir test sistemi oluşturulmuştur. Analiz sürecinde, analitik bir yaklaşım olan durum-uzay yöntemi ile endüstriyel standart ATP-EMTP yazılımı üzerinden alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar, 5×10^{-8} s ile 5×10^{-4} s arasında değişen farklı zaman adımları için tekrarlanmıştır. Elde edilen bulgular, zaman adım uzunluğu arttıkça akım ve gerilim dalga formlarının karakteristik yapısının bozulduğunu ve tepe değerlerinde büyük sapmalar meydana geldiğini göstermiştir. Özellikle büyük zaman adımlarında, kA mertebesindeki akım değerlerinin 1 A'nın altına düştüğü ve sonuçların fiziksel gerçekliğini tamamen yitirerek sayısal kararsızlığa yol açtığı tespit edilmiştir. Çalışma, yüksek frekanslı bileşenleri içeren geçici olayların doğru modellenmesi için zaman adımının sadece Nyquist-Shannon kriterini sağlamakla kalmayıp, sistemin dinamik yanıtlarını yakalayacak kadar hassas seçilmesinin mühendislik hesaplamaları açısından zorunlu olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Geçici rejim analizi, Zaman adım uzunluğu, Durum-uzay yöntemi, ATP-EMTP, Dağıtık parametrelili hatlar.

Abstract

Bearing Simulation of high-frequency transient events, such as lightning strikes in power systems, is vital for equipment safety and protection system design. In this study, the impact of time step length (Δt), which is one of the most critical parameters determining the accuracy of transient analysis, has been comprehensively analyzed. Within the scope of the study, a complex test system was created using a 300 km distributed parameter transmission line, a lightning stroke represented by the Heidler model, and a ladder network type power transformer model consisting of 10 disks. In the analysis process, results obtained from the analytical state-space method and the industry-standard ATP-EMTP software were compared. Simulations were conducted for different time steps ranging from 5×10^{-8} s to 5×10^{-4} s. The findings demonstrated that as the time step length increases, the characteristic structure of current and voltage waveforms deteriorates, and significant deviations occur in peak values. Especially at large time steps, current values in the kA range dropped below 1 A, losing physical reality and leading to numerical instability. The study proves that for the accurate modeling of transient events containing high-frequency components, choosing a time step that is precise enough to capture the system's dynamic responses rather than merely satisfying the Nyquist-Shannon criterion is essential for reliable engineering calculations.

Keywords: Transient analysis, Time step length, State-space method, ATP-EMTP, Distributed parameter lines.

1. Giriş

Elektrik enerjisi, ekonomik kalkınmanın sürdürülmesi, endüstriyel üretim süreçlerinin devamlılığı ve toplumsal yaşamın gereksinimlerinin karşılanması açısından temel enerji kaynaklarından biridir. Günümüzde sanayi tesislerinden ulaşım sistemlerine, haberleşme altyapılarından konut uygulamalarına kadar çok geniş bir kullanım alanına sahip olan elektrik enerjisinin kesintisiz, güvenilir ve yüksek verimlilikle tüketicilere ulaştırılması büyük önem taşımaktadır. Modern güç sistemleri; üretim, iletim ve dağıtım aşamalarını kapsayan, çok sayıda teknik bileşenin ve işletme parametresinin etkileşim içerisinde bulunduğu karmaşık yapılardır. Bu nedenle elektrik enerji sistemlerinin emniyetli ve ekonomik şekilde işletilebilmesi, tüm süreçlerin entegre bir yaklaşımla değerlendirilmesini gerektirmektedir. Elektrik enerjisi üretimi; kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların yanı sıra hidroelektrik, nükleer ve güneş, rüzgâr ile jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılarak gerçekleştirilmektedir. Üretim tesislerinin çoğu zaman yük merkezlerinden uzak bölgelerde kurulması, enerjinin uzun mesafeler boyunca taşınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum, iletim ve dağıtım şebekelerinin etkin ve güvenilir bir şekilde işletilmesini kritik hale getirmektedir. Düşük gerilim seviyelerinde gerçekleştirilen enerji iletiminde hat kayıpları önemli ölçüde arttığından, iletim verimliliğini yükseltmek amacıyla yüksek gerilim seviyeleri tercih edilmektedir. Böylece hem enerji kayıpları azaltılmakta hem de uzak mesafelere ekonomik enerji transferi sağlanabilmektedir. Yüksek gerilim iletim hatları, üretilen elektrik enerjisinin geniş coğrafi alanlara taşınmasını mümkün kılan temel güç sistemi bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu hatların tasarımı ve işletilmesi sürecinde gerilim seviyesi, hat uzunluğu, iletken karakteristikleri, reaktif güç yönetimi ve sistem kararlılığı gibi birçok mühendislik parametresi dikkate alınmaktadır. Güç sistemlerinin normal çalışma koşulları altındaki davranışlarının incelenmesinde kalıcı rejim analizleri önemli bir yer tutmaktadır. Bu analizler aracılığıyla güç akışı, gerilim profilleri, hat kayıpları ve gerilim düşümleri gibi performans göstergeleri değerlendirilerek sistemin işletme karakteristiği belirlenmektedir. Bununla birlikte iletim sistemlerinin performansı yalnızca kararlı çalışma durumlarıyla sınırlı olmayıp, çeşitli dış etkiler sonucu oluşan geçici rejim koşullarının da ayrıntılı olarak incelenmesini gerektirmektedir.

Geçici rejim olayları, güç sisteminde meydana gelen ani değişimlerin oluşturduğu dinamik süreçleri ifade etmektedir. Yıldırım darbeleri, kısa devre arızaları, ani yük değişimleri, anahtarlama işlemleri ve izolatör arızaları bu tür olayların başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. Geçici rejim analizleri, söz konusu olayların sistem üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, uygun koruma yöntemlerinin geliştirilmesi ve sistem güvenilirliğinin artırılması açısından önem arz etmektedir. Bu analizler sayesinde aşırı gerilim ve aşırı akım seviyeleri belirlenebilmekte, böylece ekipmanların çalışma sınırları içerisinde kalmasını sağlayacak mühendislik çözümleri geliştirilebilmektedir. Geçici rejim çalışmalarında iletim hattının doğru şekilde modellenmesi, elde edilen verilerin güvenilirliği açısından büyük bir öneme sahiptir. Kullanılan model yapıları, incelenen frekans aralığına ve hedeflenen analiz hassasiyetine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Geleneksel eşdeğer devre modelleri düşük frekanslı incelemelerde yeterli doğruluk sağlayabilse de, yüksek frekans bileşenlerinin etkili olduğu geçici olayların analizinde dağılmış parametrelili modeller daha gerçekçi sonuçlar sunmaktadır. Bu modeller, hattın empedans ve iletkenlik özelliklerini sürekli dağılım şeklinde ele alarak elektromanyetik dalga yayılımını fiziksel davranışa daha yakın biçimde temsil etmektedir. Güç sistemlerinde meydana gelen geçici olayların oluşturabileceği riskler göz önünde bulundurulduğunda, koruma sistemlerinin doğru tasarlanması ve uygun şekilde uygulanması büyük önem kazanmaktadır. İletim hattı koruma sistemleri, sistem güvenliğinin sağlanması ve arızaların etkilerinin sınırlandırılması amacıyla kullanılan temel yapılardır. Sigortalar, röleler, aşırı gerilim koruma elemanları ve kesiciler bu sistemlerin başlıca bileşenlerini oluşturmaktadır. Söz konusu ekipmanlar, anormal işletme koşullarını algılayarak gerekli koruma işlemlerini otomatik olarak gerçekleştirmekte ve arızalı bölümlerin sistemden ayrılmasını sağlamaktadır. Özellikle yıldırım etkisiyle oluşan aşırı gerilimlerin sınırlandırılmasında kullanılan parafudrlar ve topraklama sistemleri, geçici rejimlerin olumsuz sonuçlarının azaltılmasında önemli rol üstlenmektedir.

İletim hatlarında meydana gelen geçici olayların incelenmesinde hem zaman alanı hem de frekans alanı yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Zaman alanı analizleri, geçici olayların sistem davranışı üzerindeki zamana bağlı etkilerini doğrudan gözlemlene imkânı sunarken, frekans alanı analizleri sistemin farklı frekans bileşenlerine verdiği tepkinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Frekansa bağlı parametrelerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan frekans alanı yaklaşımlarında elde edilen sonuçlar, ters Fourier veya ters Laplace dönüşümleri yardımıyla yeniden zaman alanına aktarılabilir. Bu sayede ani gerilim değişimleri, elektromanyetik dalga yansımaları ve kırılmaları gibi zamana duyarlı olaylar yüksek doğrulukla modellenilebilmektedir. Zaman ve frekans alanı yöntemlerinin birlikte kullanılması, geçici rejim olaylarının hem fiziksel mekanizmalarının hem de matematiksel karakteristiklerinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Geçici rejim simülasyonlarında sonuçların doğruluğunu etkileyen temel unsurlardan biri zaman adım uzunluğudur. Özellikle yüksek frekanslı bileşenler içeren elektromanyetik geçici olayların analizinde zaman adımının uygun seçilmesi gerek sayısal doğruluk

gerekse hesaplama verimliliği açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, güç sistemleri geçici rejim simülasyonlarında farklı zaman adımı uzunluklarının gerilim ve akım dalga şekilleri üzerindeki etkileri incelenmiş, simülasyon doğruluğu ve hesaplama performansı arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, geçici rejim analizlerinde uygun zaman adımı seçimine yönelik teknik değerlendirmeler sunulmuştur.

2. Literatür Çalışması

Kurokawa ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, frekans bağımlı iletim hattı parametrelerini göz önünde bulunduran toplu parametrelili bir hat modeli ortaya konulmuştur. Söz konusu çalışmada, hattın dağıtılmış yapısını yansıtmak amacıyla π devrelerinin kaskad konfigürasyonu benimsenmiş; frekans etkisi rasyonel bir fonksiyon yardımıyla yaklaştırılarak eşdeğer bir devre biçiminde ifade edilmiştir. Elde edilen bu eşdeğer devre her π devresine entegre edilmiş ve hat boyunca geçerli olan akım-gerilim bağıntıları durum-uzay yaklaşımıyla formüle edilmiştir. Önerilen yöntemin başlıca üstünlükleri arasında zaman alanında doğrudan simülasyon gerçekleştirebilme kapasitesi ile frekans bağımlı parametrelerin hassas biçimde temsil edilmesi sayesinde geçici rejim analizlerinde yüksek doğruluk sağlanması yer almaktadır. Ek olarak, durum matrislerinin seyrek yapısı hesaplama etkinliğinin artırılmasına önemli katkı sağlamıştır. Tek fazlı ve üç fazlı iletim hatları üzerinde yürütülen doğrulama testlerinde önerilen modelin EMTP sonuçlarıyla örtüştüğü görülmüştür.

Mamiş ve ark. (2010) tarafından yürütülen çalışmada, dağınık parametrelili iletim hatlarındaki geçici akımların hesaplanmasına yönelik olarak hareket eden dalgalar ilkesine dayalı bir durum değişkeni yaklaşımı geliştirilmiştir. Kayıpsız hat koşulunda karakteristikler yöntemi esas alınarak sistemin durum denklemleri oluşturulmuş; indüktör akımları ile kapasitör gerilimleri durum değişkeni olarak tanımlanmıştır. İlgili denklemler, trapezoidal entegrasyon kuralı aracılığıyla fark denklemleri sistemine dönüştürülmüş ve zaman alanında çözüme kavuşturulmuştur. Durum değişkenleri yöntemiyle elde edilen çıktıların EMTP ve frekans alanı tabanlı klasik yöntemlerle karşılaştırılması sonucunda önerilen yaklaşımın doğruluğu teyit edilmiştir.

Colqui ve ark. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tek fazlı bir iletim hattının zaman alanındaki geçici rejim simülasyonları için özyinelemeli konvolüsyon ve vektör uydurma tekniklerine dayanan bir metodoloji benimsenmiştir. Farklı gerilim kaynaklarının uygulandığı ve alıcı uç koşullarının değiştirildiği 150 km uzunluğundaki tek fazlı bir hat üzerinde önerilen metodolojinin başarımı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, frekans alanında türetilen ve zaman alanı yanıtlarının elde edilmesinde sayısal ters Laplace dönüşümünden yararlanan evrensel hat modeliyle kıyaslanmıştır. Karşılaştırma sonuçları, önerilen yaklaşımın uygulamadaki kolaylığının yanı sıra yüksek doğruluk sunduğunu ve geçici rejim analizleri için uygulanabilir bir araç niteliği taşıdığını ortaya koymuştur.

Colqui ve ark. (2019) tarafından yürütülen çalışmada, π devre kaskadına dayalı toplu parametrelili iletim hattı modellerinde geçici rejim analizleri sırasında ortaya çıkan ve hatalı tepe değerlerine yol açan sayısal salınımları bastırmaya yönelik bir metodoloji sunulmuştur. Yöntem, şönt kapasitöre seri bağlanan bir direnç elemanı ile yeniden tasarlanan geliştirilmiş π devre yapısı üzerinde uygulanmıştır. Önerilen metodolojiden elde edilen bulgular, ters sayısal Laplace dönüşümü yanıtları ve toplu parametrelili model çıktılarıyla karşılaştırılmış; geçici rejim yanıtlarındaki sayısal salınımların belirgin biçimde azaldığı gözlemlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler, önerilen yaklaşımın etkin ve güvenilir sonuçlar ürettiğini ortaya koymuştur.

Bilal ve ark. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, güç dağıtım şebekelerinin geçici rejim analizine yönelik frekans alanı tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen metodoloji, elektrik devre elemanlarının frekans domeninde modellenmesini ve buna karşılık gelen admitans değerlerinin sistem matrisine dahil edilmesini temel almaktadır. Matris boyutuna bağlı olarak simülasyon sürelerinin birkaç saate ulaşabilmesi nedeniyle hesaplama yükünü azaltmak amacıyla ağ indirgeme teknikleri uygulanmıştır. Admitans matrisinin küçültülmesinde Kron indirgeme yöntemi kullanılmış; indirgeme işleminin ardından sistemin zaman domenindeki tepkisi sayısal ters Laplace dönüşümü ile elde edilmiştir. Önerilen yöntemden elde edilen sonuçların ATP-EMTP çıktılarıyla karşılaştırılması, her iki yaklaşım arasında yüksek düzeyde uyum bulunduğunu göstermiştir.

Ghiasi ve ark. (2022) tarafından yürütülen çalışmada, dağınık parametrelili bir iletim hattının kısa devre ve anahtarlama koşulları altındaki geçici rejim davranışının zaman alanında incelenmesine yönelik Bergeron modeli esas alınarak yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde iletim hattı küçük bölümlere ayrılmış ve her bir kesitteki gerilim ile akım ilişkisi matematiksel ifadelerle tanımlanmıştır. Bu sayede hattın yalnızca bir ucundaki ölçümlerden hareketle diğer noktadaki büyüklüklerin hesaplanması mümkün kılınmıştır. Yöntemin; daha kısa hesaplama süreleri, azaltılmış veri girişi gereklilikleri, düşük bellek tüketimi ve simetrik ya da asimetrik tek fazlı ile

çok fazlı hatlarda geniş uygulanabilirlik gibi belirgin avantajlar sunduğu saptanmıştır. Önerilen yöntemin EMTP ile karşılaştırmalı doğrulaması başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Chaban ve ark. (2023) tarafından yürütülen çalışmada, 476 km uzunluğunda 750 kV ultra yüksek gerilimli (UYG) bir iletim hattında geçici rejim analizi yapılmış ve koruma iletkenlerinin sistem davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla koruma iletkenlerini dağıtılmış parametrelili bir sistem çerçevesinde ele alan matematiksel bir model oluşturulmuştur. Söz konusu model, ikinci mertebeden kısmi diferansiyel denklemler biçiminde ifade edilmiş; koruma iletkenleri ile faz iletkenleri arasındaki elektromanyetik etkileşimlerin doğru biçimde yansıtılması için Neumann ve Poincaré sınır koşullarından yararlanılmıştır. Hat açma-kapama manevrası ve tek fazlı arıza senaryoları EMTP ve MATLAB/Simulink ortamlarında sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Anahtarlama anında A fazında 720 kV düzeyine ulaşan aşırı gerilimler tespit edilmiş; arıza koşulunda ise A fazı geriliminin arıza bölgesine yakın noktalarda 26 kV'a gerilediği gözlemlenmiştir. Koruma iletkenlerinde kararlı hâl akımının sıfır olduğu, buna karşın geçici rejim sürecinde anlık akım değerinin 400 A'e ulaştığı belirlenmiştir. Önerilen modelden elde edilen sonuçların teorik öngörülerle tam uyum içinde olduğu doğrulanmıştır.

Ma ve ark. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yıldırım darbesine maruz kalan 245 kV sınıfı bir güç transformatörü sargısındaki gerilim dağılımının incelenmesi amacıyla bir devre modeli geliştirilmiştir. Model parametreleri sonlu elemanlar yöntemi ve analitik ifadeler kullanılarak türetilmiş; transformatör 14 diske ayrılarak her disk için ayrı bir eşdeğer devre modeli oluşturulmuştur. Analizde standart 1.2/50 μ s yıldırım darbe dalgası esas alınmış ve gerilim dağılımı zaman alanında incelenmiştir. Disk numarası arttıkça tepe gerilim değerlerinin azaldığı saptanmıştır. Önerilen modelin deneysel ölçümlerle karşılaştırılması sonucunda yaklaşımın geçerliliği kanıtlanmıştır.

Jurišić ve ark. (2024) tarafından yürütülen çalışmada, güç transformatörlerinin geçici durum analizine yönelik analitik yöntemler ile sonlu elemanlar yöntemini harmanlayan hibrit bir yaklaşım önerilmiştir. Transformatör sargısının yüksek frekans modellemesinde toplu RLC parametrelerinden yararlanılmış ve oluşturulan model Dommel yöntemi ile zaman alanında çözülmüştür. Kapasitans değerleri sonlu elemanlar yöntemine dayalı analitik modellerle hesaplanırken indüktans ve direnç değerleri doğrudan analitik ifadeler aracılığıyla elde edilmiştir. Önerilen yaklaşımın, binlerce sarım içeren karmaşık transformatör geometrilerinde dahi hızlı ve verimli hesaplama imkânı sunduğu vurgulanmıştır. Analitik hesaplamalara düzeltme katsayısı dahil edilmiş; disk sargılarına ilişkin sonuçlar deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır.

Ghorbal ve ark. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yıldırım darbe test devresinin zaman alanında simülasyonu için durum-uzay yöntemine dayalı bir yaklaşım sunulmuştur. Tam dalga ve kırılmış dalga darbeleri zaman alanında modellenmiştir. Frekans tepki analizi ve vektör uydurma yöntemleri uygulanarak frekanstan bağımsız parametreler içeren bir transformatör modeli elde edilmiş; ardından durum-uzay sistemindeki eşdeğer devre denklemleri çözüme kavuşturulmuştur. Zaman alanındaki diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünde MATLAB yazılım ortamından yararlanılmıştır. Simüle edilen yıldırım darbesi sinyallerinin ölçüm verileriyle karşılaştırılması, önerilen yöntemin yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur.

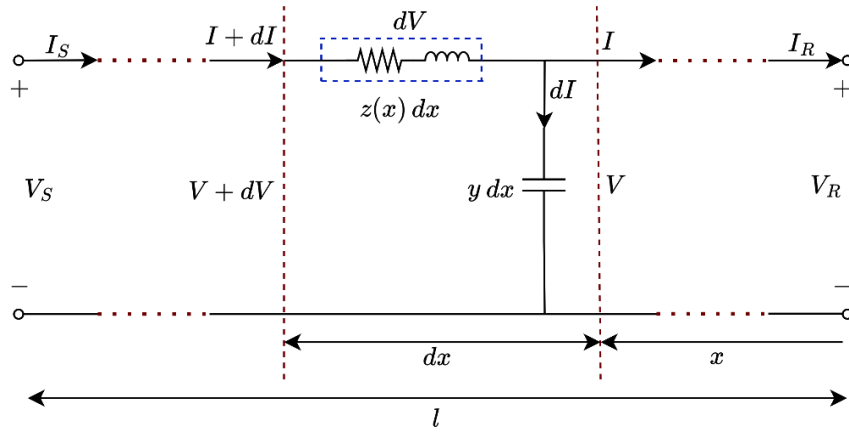
Adamczyk ve ark. (2024) tarafından yürütülen çalışmada, disk ve katman sargı konfigürasyonları karşılaştırmalı olarak ele alınarak güç transformatörü sargılarındaki başlangıç gerilim dağılımı analiz edilmiştir. Çalışmada 50 V genlikli 1.2/50 μ s standart yıldırım darbesi kaynak olarak kullanılmış ve analizler gerçek ölçekli sargı modelleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her iki sargı tipindeki başlangıç gerilim dağılımları nitel ve nicel yöntemlerle deneysel olarak incelenmiş; aralarındaki farklar sistematik biçimde ortaya konulmuştur. Sonuçlar, iki sargı tipindeki başlangıç gerilim dağılımının farklılığının toplu kapasitans ağlarının yapısal özelliklerinden kaynaklandığını açıkça göstermiştir.

Literatür incelemesi bir bütün olarak değerlendirildiğinde, enerji iletim hatlarının geçici rejim analizi kapsamında çok çeşitli yöntem ve yaklaşımların benimsendiği görülmektedir. Bir kısım çalışma yalnızca iletim hatlarına özgü geçici rejim davranışlarını ele alırken, diğer bir kısmı yıldırım darbelerinin güç transformatörleri üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Benzer biçimde, bazı araştırmalarda toplu parametrelili hat modelleri kullanılırken, bazılarında dağıtılmış parametrelili modeller tercih edilmiştir. Geçici rejim simülasyonlarının farklı koşullar ve senaryolar çerçevesinde çeşitli yöntem ve teknikler aracılığıyla gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, incelenen çalışmaların hiçbirinde zaman adım uzunluğunun simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi sistematik olarak ele alınmamıştır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu gidermek amacıyla diğer çalışmalardan farklı olarak geçici rejim simülasyonlarında zaman adım uzunluğunun çıktılar üzerindeki etkisini kapsamlı biçimde incelemiş ve irdelemiştir.

3. Güç Sistemi Bileşenlerinin Modelleri

3.1. Enerji İletim Hattı Modeli

Enerji iletim hatlarını oluşturan iletkenlerin birim uzunluk başına tanımlanan direnç (r), endüktans (l), kapasitans (c) ve kondüktans (g) olmak üzere dört temel elektriksel parametresi mevcuttur. Bu parametreler belirli noktalarda toplanmış olmayıp iletim hattı güzergahı boyunca sürekli ve düzgün bir dağılım sergilemektedir. Hat parametrelerinin fiziksel dağılım biçimine bağlı olarak iletim hatları iki farklı model çerçevesinde incelenmektedir: toplu parametrelili hat modeli ve dağılık parametrelili hat modeli. Bu çalışmada tercih edilen modelleme yaklaşımı dağılık parametrelili iletim hattı modelidir. Dağılık parametrelili modelde, hat boyunca herhangi bir konumda diferansiyel uzunlukta bir kesit seçilerek ilgili büyüklüklere ait matematiksel ifadeler türetilmektedir. Böyle bir diferansiyel kesit için oluşturulan eşdeğer devre Şekil 1'de verilmiştir. Dağılık parametrelili modeli toplu parametrelili modelden ayıran temel özellik, hat parametrelerinin birim uzunluk başına ifade edilmesi ve hattın tamamına dağıtılmış olarak ele alınmasıdır. Dağılık parametrelili iletim hattı modeli; uzun mesafeli güç iletim hatlarının analizi, haberleşme sistemlerindeki yüksek frekanslı iletim problemleri ve geçici rejim koşullarında hat üzerinde yayılan seyahat eden dalgaların incelenmesi gibi uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır.



Şekil 1. Dağılık parametrelili iletim hattı modeli.

3.1.2. Kayıpsız İletim Hattı Modeli

Kayıpsız hat koşulunda ($r=0$, $g=0$) Bergeron yaklaşımı uygulandığında, denklem (1) ve denklem (2) sırasıyla iletim hattı boyunca yayılan ileri ve geri yönlü dalga bileşenlerini ifade eden formüllere dönüşmektedir (Bergeron, 1961; Branin et al., 1967; Dommel, 1969).

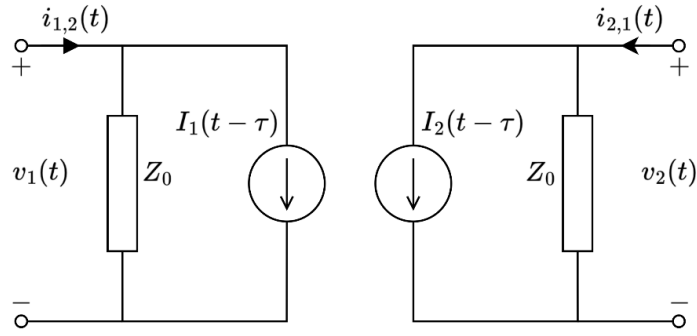
$$v(x,t) + Z_0 i(x,t) = 2Z_0 f_1(x-vt) \quad (1)$$

$$v(x,t) - Z_0 i(x,t) = -2Z_0 f_2(x+vt) \quad (2)$$

Bu yaklaşım, karakteristikler yöntemini matematiksel temel olarak benimsemektedir. Bu formülasyon, iletim hattının gönderici ve alıcı uçları arasında bir eşdeğer devrenin kurulmasına imkân tanımaktadır. 1 ve 2 numaralı düğüm noktalarından oluşan bir iletim hattı göz önüne alındığında, hat üzerindeki dalga seyahat süresi τ ve hat uzunluğu d ile tanımlanmaktadır.

$$\tau = d / v = d \sqrt{lc} \quad (3)$$

Kayıpsız bir iletim hattının modellenmesi amacıyla, akım kaynakları ve empedans elemanlarını kapsayan bir eşdeğer devre oluşturulabilmektedir (Dommel, 1969). Söz konusu eşdeğer devre, iki kapılı bir yapı olarak tanımlanmakta olup ilgili devre Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kayıpsız dağıtık parametrelili iletim hattı eşdeğer devresi.

Eşdeğer devrede yer alan I_1 ve I_2 akım kaynaklarının t anındaki değerleri, $(t-\tau)$ gecikmeli geçmiş zaman adımına ait akım büyüklüklerinden hesaplanmaktadır.

$$I_1(t-\tau) = -(1/Z_0)v_2(t-\tau) - i_{2,1}(t-\tau) \quad (4)$$

$$I_2(t-\tau) = -(1/Z_0)v_1(t-\tau) - i_{1,2}(t-\tau) \quad (5)$$

Karakteristikler yöntemi hem kayıpsız hem de kayıplı iletim hatlarının simülasyonunda uygulanabilir bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Kayıplı bir iletim hattının toplam seri direncinin $R'=rd$ olduğu kabul edildiğinde, bu kayıplar iki farklı biçimde devreye dahil edilebilmektedir: toplam direncin eşit parçalara bölünerek $R'/2$ değerinde direnç elemanlarının hattın her iki terminaline yerleştirilmesi ya da $R'/4$ değerinde dirençlerin terminallere, $R'/2$ değerinde bir direncin ise hattın orta noktasına eklenmesi. Bu durumda Şekil 2'de yer alan Z_0 karakteristik empedansı yerine düzeltilmiş empedans bağıntısı kullanılmakta ve geçmiş akım değerleri aşağıdaki ifadelerle hesaplanmaktadır (Dommel, 1992; Mamiş ve ark., 2010):

$$I_1(t-\tau) = \left(\frac{1+h}{2}\right) \left[(-1/Z)v_2(t-\tau) - hi_{2,1}(t-\tau)\right] + \left(\frac{1-h}{2}\right) \left[(-1/Z)v_1(t-\tau) - hi_{1,2}(t-\tau)\right] \quad (6)$$

$$I_2(t-\tau) = \left(\frac{1+h}{2}\right) \left[(-1/Z)v_1(t-\tau) - hi_{1,2}(t-\tau)\right] + \left(\frac{1-h}{2}\right) \left[(-1/Z)v_2(t-\tau) - hi_{2,1}(t-\tau)\right] \quad (7)$$

Yukarıda verilen denklemlerde,

$$h = \left(Z_0 - \frac{rd}{4}\right) / \left(Z_0 + \frac{rd}{4}\right),$$

r : İletim hattının birim uzunluk başına düşen direnç parametresi (Ω/m),

l : İletim hattının birim uzunluk başına düşen endüktans parametresi (H/m),

c : İletim hattının birim uzunluk başına düşen kapasitans parametresi (F/m),

g : İletim hattının birim uzunluk başına düşen kondüktans parametresidir (S/m).

3.2. Heidler Yıldırım Darbe Modeli

Heidler yıldırım modeli, yıldırım darbe akımının zamana bağlı davranışını matematiksel olarak temsil etmek amacıyla geliştirilmiş bir analitik modeldir. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC 62305-1) başta olmak üzere uluslararası standart kuruluşları tarafından referans model statüsünde kabul görmesi ve geniş bir uygulama yelpazesine sahip olması, bu modeli yıldırım kaynaklı geçici aşırı gerilimlerin doğru biçimde belirlenmesinde en yaygın başvuru yaklaşımına taşımaktadır. Modelin içerdiği matematiksel ifadelerin diğer yaklaşımlara kıyasla daha karmaşık bir yapı sergilemesi ve daha yoğun hesaplama gerektirmesi, yöntemin bir kısıtı olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, söz konusu hesaplama karmaşıklığı daha gerçekçi ve fiziksel olgularla daha iyi

örtüşen sonuçların elde edilmesini beraberinde getirmektedir. Yıldırım akımının dalga biçimini yüksek doğrulukla yansıtmak üzere tasarlanan Heidler modeli, aşağıda verilen matematiksel fonksiyon ile ifade edilmektedir (Heidler et al., 1999; Heidler & Cvetić, 2002):

$$I(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} x(t)y(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (8)$$

Burada;

$I_{\max}$: Yıldırım akımına ait maksimum tepe değerini,

η : Tepe değerine ilişkin düzeltme katsayısını,

t : Zamanı,

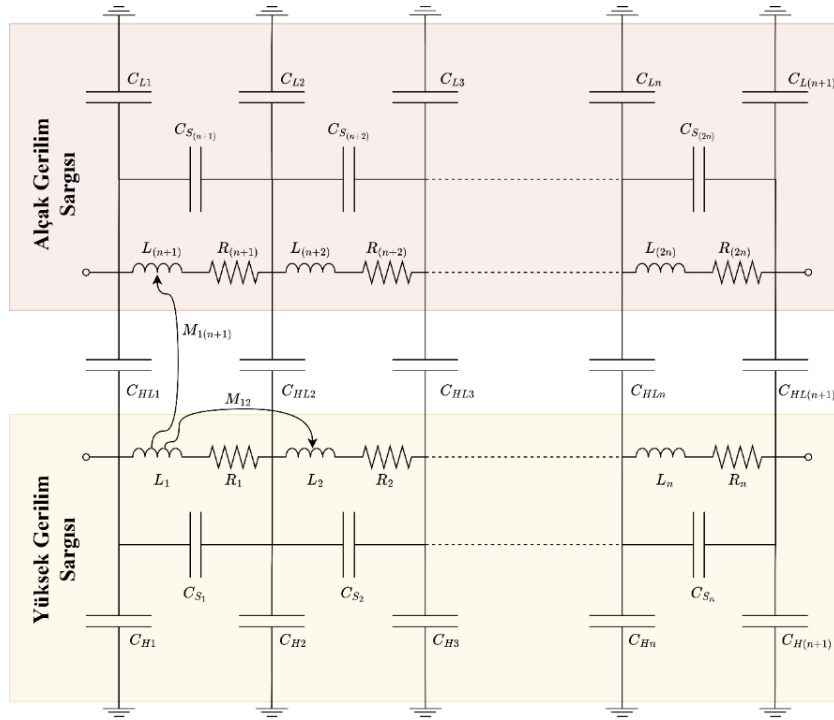
τ_1 : Akımın yükselme evresini tanımlayan zaman sabitini,

τ_2 : Akımın düşme (sönümlenme) evresini tanımlayan zaman sabitini,

n : Akım dalga biçiminin dikliğini belirleyen üstel faktörü ifade etmektedir.

3.3. Transformatör Modeli

Güç transformatörleri, güç sistemlerinin vazgeçilmez unsurları arasında yer almakta olup doğrusal ve doğrusal olmayan koşullar dahil olmak üzere çeşitli gerilim ve frekans aralığında işlev görebilmektedir. Düşük frekanslardaki (50/60 Hz) çalışma karakteristikleri geleneksel olarak kapsamlı biçimde ele alınmış olmakla birlikte, transformatörlerin yüksek frekans (kHz ve MHz mertebesinde) davranışları, özellikle geçici rejim analizleri söz konusu olduğunda belirleyici bir öneme sahiptir. Yüksek frekans bölgesinde transformatör modellemesi; bu cihazların geçici olaylara karşı duyarlılığının ortaya konulması, elektromanyetik girişim etkilerinin anlaşılması ve yıldırım darbeleri ile anahtarlama işlemleri gibi uyarılara karşı sistemin tepkisinin önceden kestirilebilmesi bakımından kritik bir işlev üstlenmektedir. Bu bağlamda, güç transformatörlerinin yüksek frekans modellemesi pek çok mühendislik uygulamasında stratejik bir önem taşımaktadır. Güç transformatörlerinin yüksek frekans davranışlarının modellenmesinde farklı teorik çerçevelere dayanan çeşitli yaklaşımlar benimsenmektedir. Bu yaklaşımların başında alan tabanlı modeller, devre tabanlı modeller ve her iki yöntemi bir arada kullanan hibrit modeller gelmektedir. Literatürde yaygın biçimde başvurulan sargı modelleri arasında Çok İletkenli İletim Hatları (MTL), Dairesel Çok İletkenli İletim Hatları (CMTL), merdiven ağları ve hibrit yapılar (MTL-merdiven ağı kombinasyonları) sayılabilmektedir (Samal & Mondal, 2023). MTL ve CMTL yaklaşımları sarım tabanlı modelleme stratejileri olarak sınıflandırılırken, bu çalışmada disk yapılı merdiven ağı modeli tercih edilmiştir. Şekil 3'te primer (yüksek gerilim) ve sekonder (alçak gerilim) sargılarının her ikisini de kapsayan çift merdivenli ağ modeli sunulmaktadır. Buna karşın tek merdivenli model, transformatörün sadece yüksek gerilim ya da alçak gerilim sargısını temsil etmekte olup bu çalışmada söz konusu model esas alınmıştır. Merdiven ağı yaklaşımı, transformatörlerin frekans tepkisi analizi çalışmalarında sıklıkla kullanılmakta ve yüksek frekanslı güç transformatörü modeli olarak da anılmaktadır.

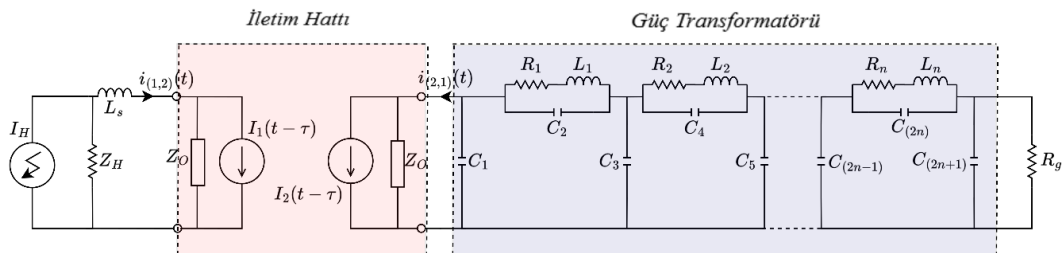


Şekil 3. Güç transformatoru sargısının çift merdivenli ağ eşdeğer devresi.

Bir güç transformatorüne ait merdiven ağı modeli, R, L ve C parametrelerini bünyesinde barındıran çok sayıda bölümün seri olarak birbirine bağlanmasıyla meydana gelmektedir. Toplu parametrelerden oluşan her bir bölüm, eşdeğer devre düzleminde transformator sargısındaki bir disk temsil etmektedir. Buna bağlı olarak, sargıdaki toplam disk sayısı modelde yer alacak bölüm sayısını doğrudan belirlemektedir. R_s , L_s , C_s , C_g ve C_{HL} sembolleriyle ifade edilen toplu parametreler sırasıyla seri direnci, öz endüktansı, seri kapasitansı, şönt (toprak) kapasitansını ve transformatorün yüksek gerilim ile alçak gerilim sargıları arasındaki karşılıklı kapasitansı temsil etmektedir. Transformator merdiven ağı modelinin parametre değerleri; sargı geometrisi ve fiziksel boyutlar gibi tasarım verileri ya da önceden elde edilmiş ölçüm sonuçları kullanılarak tahmin edilebilmekte veya analitik olarak hesaplanabilmektedir. Model parametrelerinin belirlenmesinde başvurulan temel yöntemler arasında terminal ölçümüne dayalı yöntemler, analitik hesaplama yaklaşımları ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) yer almaktadır (Samal & Mondal, 2022).

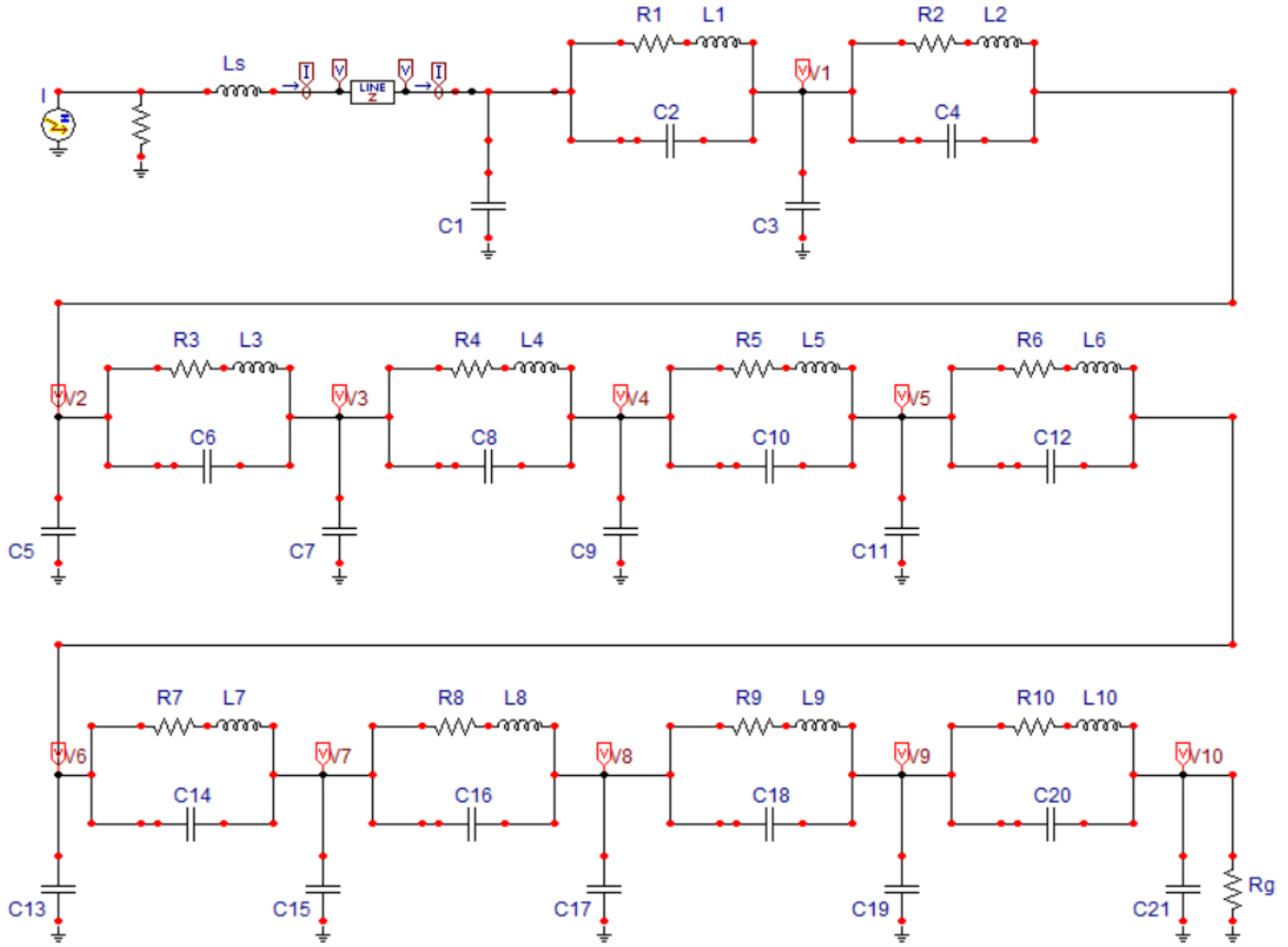
3.4. İletim Hattının Transformator ve Yıldırım Darbesiyle Modellenmesi

Bu çalışma kapsamında, dağıtık parametrelili tek fazlı bir iletim hattının alıcı ucuna disk tipi sargı yapısına sahip bir güç transformatorünün yüksek gerilim sargısının tek fazı bağlanmış; iletim hattının faz iletkenine yıldırım darbesi uygulanmıştır. Yıldırım akımının matematiksel olarak modellenmesinde Heidler yıldırım darbe modeli esas alınmıştır. Transformator sargısındaki disk sayısının artmasıyla birlikte durum-uzay yöntemi çerçevesinde oluşturulan sistem matrislerinin boyutları da orantılı biçimde büyümektedir. İncelenen sisteme ait eşdeğer devre Şekil 4'te sunulmaktadır.



Şekil 4. İletim hattı- güç transformatorü yıldırım darbesi eşdeğer devresi.

Bu çalışmaya ait eşdeğer devrenin ATP-EMTP modeli Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. İletim hattı-güç transformatörü yıldırım darbesi ATP-EMTP modeli.

ATP-EMTP modelinde kullanılan dağıtık parametrelili iletim hattı modeli, disk tipi sargılı güç transformatörünün yüksek frekans modeli ve Heidler yıldırım darbe modeline ait parametre değerleri sırasıyla Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 1. Dağıtık parametrelili iletim hattı parametreleri

d	300 km
r	0.02 Ω/km
l	1.14 mH/km
c	9.8 nF/km
L_s	50 mH

Tablo 2. Disk yapılı güç transformatörü parametreleri

	Yüksek Gerilim Tarafı (Primer)	Alçak Gerilim Tarafı (Sekonder)
C_g	61.19 pF	115. 53 pF
C_{tr}	393.4 pF	127.67 pF
L_{tr}	10 μ H	10.5 μ H
R_{tr}	1 Ω	0.25 Ω
R_g	1 Ω	1 Ω
C_{HL}	89.283 pF	
N	10	

Tablo 3. Heidler yıldırım darbesi modeli ve yük parametreleri

$I_{\max}$	20 kA
τ_1	1.2 μ s
τ_2	50 μ s
n	10
Z_H	400 Ω
R	1 k Ω
C	0.1 μ F

4. Yöntem

Bu çalışmada, güç sistemlerinin geçici rejim analizinde zaman adım uzunluğunun simülasyon sonuçları üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla durum-uzay yöntemi ve ATP-EMTP simülasyon yazılımından eş zamanlı olarak yararlanılmıştır.

Durum-uzay yöntemi, doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik sistemlerin matematiksel olarak modellenmesi, davranışlarının analiz edilmesi ve denetlenmesi amacıyla mühendislik alanında yaygın biçimde başvurulmuş güçlü bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel diferansiyel denklem tabanlı çözüm yöntemlerine kıyasla durum-uzay formülasyonu, sistemin dinamik karakteristiklerini vektör ve matris gösterimleri aracılığıyla ele alarak daha kapsamlı ve bütünlük bir analiz çerçevesi ortaya koymaktadır. Çok girişli çok çıkışlı (MIMO) sistem yapılarının modellenmesine özellikle elverişli olması, bu yöntemin farklı mühendislik disiplinlerinde geniş bir uygulama yelpazesine kavuşmasını sağlamıştır. Yöntemin temel işleyiş ilkesi, sistemin dinamiğini birinci mertebeden diferansiyel denklemler takımı biçiminde ifade etmeye ve bu sayede sistemin herhangi bir t anındaki durumunu tam olarak betimleyen bir durum vektörü tanımlamaya dayanmaktadır. Durum vektörü sistemin geçmişine ilişkin tüm bilgiyi eksiksiz biçimde bünyesinde barındırdığından, sistemin ilerleyen zamanlardaki dinamik davranışı yalnızca bu vektörün zaman içindeki değişimi izlenerek belirlenebilmektedir.

Durum-uzayı modeli, sistemin durum değişkenleri, giriş büyüklükleri ve çıkış büyüklükleri arasındaki matematiksel ilişkileri tanımlayan iki temel denklem üzerine inşa edilmektedir: durum denklemi ve çıkış denklemi. Söz konusu denklemler aşağıda verilmektedir.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (9)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (10)$$

Burada;

$x(t)$: Durum vektörünü,

$u(t)$: Giriş vektörünü,

$y(t)$: Çıkış vektörünü,

A : Sistem matrisini,

B : Giriş matrisini,

C : Çıkış matrisini,

D : Doğrudan iletim matrisini temsil eder.

Yukarıda tanımlanan A , B , C ve D matrisleri, en genel ifadeleriyle sistemin katsayı matrisleri olarak adlandırılmaktadır. Durum denkleminin alternatif bir gösterim biçimi denklem (11)'de sunulmakta olup bu ifade, n . mertebeden bir devreye ait durum denklemleri takımını temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{m1} & \cdots & B_{mn} \end{bmatrix} u(t) \quad (11)$$

Bu denklem takımı aracılığıyla sistemin bütünsel dinamik davranışı doğrusal cebir yöntemleri çerçevesinde kapsamlı biçimde incelenebilmektedir. Söz konusu katsayı matrisleri kullanılarak sistemin kararlılık özellikleri, kontrol edilebilirlik koşulları ve gözlemlenebilirlik nitelikleri sistematik olarak değerlendirilebilmektedir. Durum-uzay yöntemi; enerji sistemleri, sinyal işleme, otomatik kontrol ve elektromanyetik alan modellemesi gibi çok sayıda mühendislik alanında etkin bir analiz ve tasarım aracı işlevi görmektedir. Yöntem, başta elektrik güç sistemleri olmak üzere geçici rejim davranışlarının incelenmesi ve yüksek frekanslı olayların matematiksel olarak modellenmesi gereken durumlarda öncelikli olarak tercih edilmektedir.

Dağınık parametrelili bir iletim hattının eşdeğer devresi, akım kaynakları ile direnç, endüktans ve kapasitans gibi temel empedans elemanlarının bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Yüksek frekanslı güç transformatörünün eşdeğer devresinin de aynı türden empedans elemanlarını içerdiği göz önünde bulundurulduğunda hem iletim hattı hem de transformatör modelinin durum-uzay formülasyonuna entegre edilebileceği anlaşılmaktadır. Eşdeğer devrelerin durum-uzay modeline dahil edilmesinin ardından, kapasitörlere ait gerilim değerleri ve indüktörlere ait akım değerleri sistemin durum değişkenleri olarak tanımlanmaktadır. İletim hatlarına ait durum denklemleri, geçmiş zaman adımlarına ilişkin akım değerlerini içermektedir. Bu geçmiş akım değerlerinin çözüm sürecinin her zaman adımında güncellenmesi zorunludur. Söz konusu güncellenmenin gerçekleştirilebilmesi için durum denklemlerinin ayrıştırılması gerekmekte olup bu işlem durum denklemlerinin sayısal entegrasyon yoluyla çözülmesiyle sağlanmaktadır. Bu çalışmada sayısal entegrasyon yöntemi olarak trapezoidal kural benimsenmiştir. x_k 'nin $t_k=k\Delta t$ anındaki değerinin bulunduğu varsayımı altında, denklem (9)'a trapezoidal entegrasyon kuralı uygulanarak sistem bir fark denklemleri takımına dönüştürülebilmektedir. Buna göre $t_{(k+1)}=(k+1)\Delta t$ anındaki sistem tepkisi denklem (12) aracılığıyla elde edilmektedir.

$$\left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)(x_{k+1}) = \left(I + \frac{\Delta t}{2} A\right)x_k + \frac{\Delta t}{2} B(u_k + u_{k+1}) \quad (12)$$

Burada k ve $k+1$ alt simgeleri, sırasıyla t_k ve t_{k+1} zaman anlarına karşılık gelen durum vektörü x ile giriş vektörü u 'nun ilgili zaman adımıdaki değerlerini göstermektedir. Δt ise ardışık iki zaman noktası arasındaki adım uzunluğunu ifade etmektedir. Herhangi bir t anına ait geçmiş akım değerleri, $(t-\tau)$ zaman anındaki büyüklüklerden yararlanılarak hesaplanabilmektedir. Sistemin zaman alanındaki dinamik tepkisinin belirlenmesi amacıyla durum vektörü, $k=0$ anındaki bilinen başlangıç koşulundan hareket edilerek ayırık zaman noktalarında yinelemeli biçimde hesaplanmaktadır. Bu süreç, denklem (12)'nin her zaman adımımda eş zamanlı olarak çözülmesini gerektirmektedir. Denklemlerin sadeleştirilmiş formu ise denklem (13)'te sunulmaktadır.

$$\bar{A}x_{k+1} = b_k \quad (13)$$

$$\bar{A} = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right) \quad (14)$$

$$b_k = \left(I + \frac{\Delta t}{2} A\right)x_k + \frac{\Delta t}{2} [B(u_k + u_{k+1})] \quad (15)$$

Sistemin zaman alanındaki tepkisinin elde edilebilmesi için x_{k+1} durum vektörünün $k=0$ başlangıç koşulundan itibaren denklem (13) kullanılarak yinelemeli olarak hesaplanması gerekmektedir.

Güç sistemlerinin zaman alanındaki dinamik simülasyonlarında zaman adımı uzunluğunun (Δt) seçimi, hesaplama yükü ile sonuçların doğruluğu arasındaki dengenin kurulmasında kritik bir role sahiptir. Simülasyon ortamında sürekli zamanlı sistemlerin ayrıklaştırılması, sinyal işlemenin temel teorilerinden biri olan Nyquist-Shannon örnekleme teoremine dayanmaktadır. Teoreme göre bir sinyalin kayıpsız temsil edilebilmesi için örnekleme frekansı, sinyaldeki en yüksek frekans bileşeninin en az iki katı olmalıdır (Vahabzadeh ve ark., 2025):

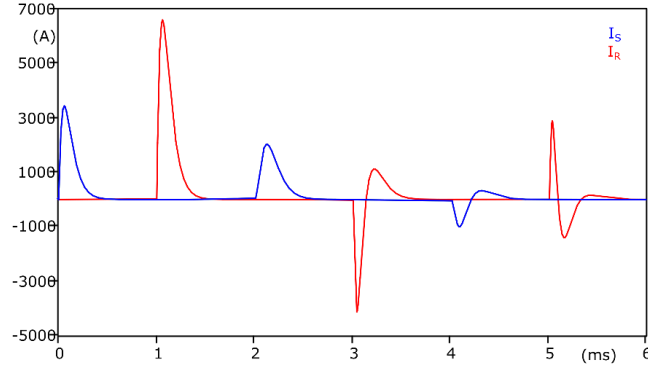
$$\left. \begin{aligned} f_s &\geq 2 f_{\max} \\ f_s &= \frac{1}{\Delta t} \\ \Delta t &\leq \frac{1}{2 f_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Güç sistemi simülasyonlarında yalnızca Nyquist şartını sağlamak genellikle yeterli değildir. Çünkü amaç sadece sinyali örnekleme değil; diferansiyel denklemleri çözmek, geçici olayları doğru yakalamak, sayısal kararlılığı korumaktır. Bu nedenle mühendislik uygulamalarında genellikle: $f_s = 10 f_{\max}$ olarak hesaplanır. Burada f_s örnekleme frekansını (Hz), $f_{\max}$ sinyaldeki en yüksek frekans bileşenini (Hz) temsil etmektedir. Dolayısıyla zaman adım uzunluğu denklem (17)'deki verildiği gibi hesaplanır (Abourida ve ark., 2016).

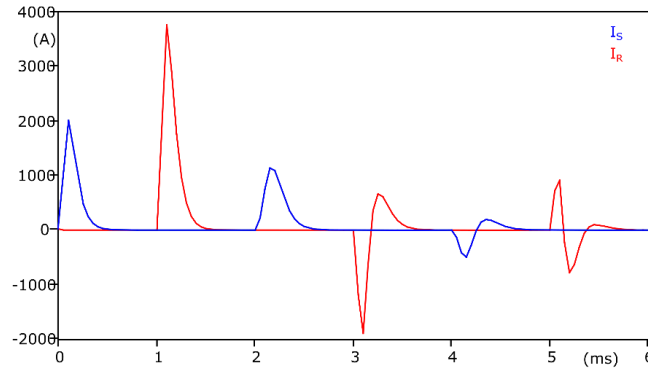
$$\Delta t \leq \frac{1}{10 f_{\max}} \quad (17)$$

5. Bulgular

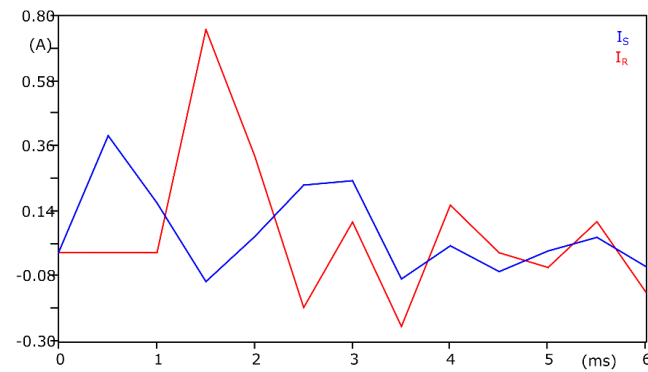
Şekil 4'te verilen eşdeğer devreye durum-uzay yöntemi uygulandığında ve Şekil 5'teki eşdeğer devrenin ATP-EMTP ortamında simüle edilmesiyle birlikte, farklı Δt (zaman adım uzunluğu) değerlerine karşılık gelen simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir.



(a)



(b)



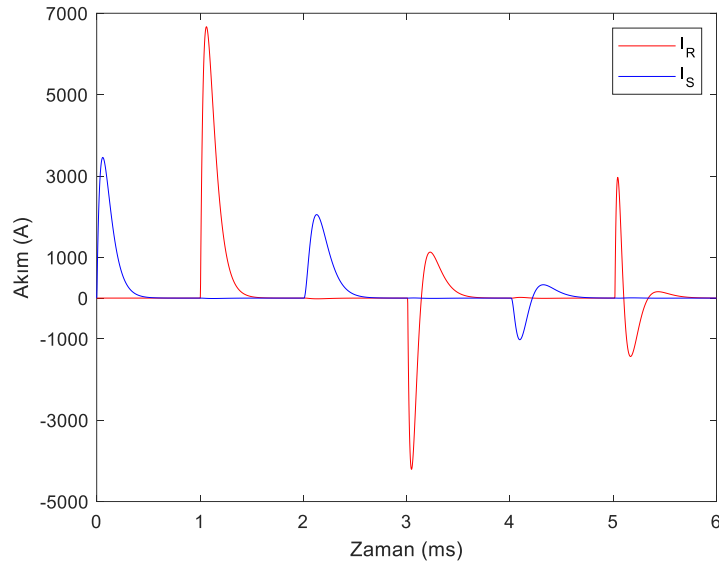
(c)

Şekil 6. ATP-EMTP akım dalga formları (a) $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s, (b) $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s, (c) $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.

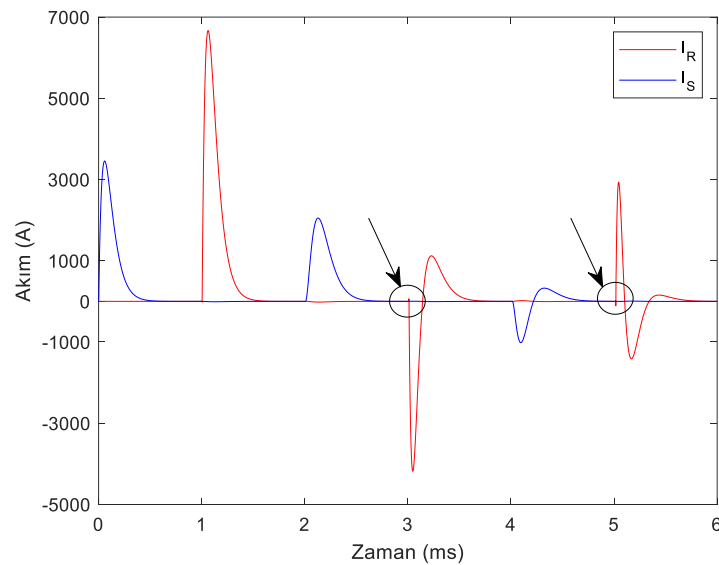
Şekil 6'daki akım dalga formları, hat sonuna transformatör bağlanmış dağıtık parametrelili bir iletim hattının yıldırım darbesine maruz kalması senaryosunda elde edilen simülasyon çıktılarıdır. İlgili grafikler incelendiğinde, zaman adım uzunluğunun artmasıyla birlikte akım dalga formlarında belirgin bozulmaların meydana geldiği açıkça gözlemlenmektedir. $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s adım uzunluğunda yıldırımın düştüğü noktadaki tepe akım değeri 6600 A, transformatörün bağlandığı uçtaki tepe akım değeri ise 3500 A olarak elde edilmektedir. Buna karşın adım

uzunluğunun $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s'ye çıkarılması durumunda söz konusu tepe akım değerlerinin sırasıyla 3800 A ve 2000 A'e gerilediği görülmektedir. Adım uzunluğunun $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s değerine ulaşması halinde ise her iki akım değerinin de 1 A'in altına düştüğü saptanmaktadır. ATP-EMTP ortamında $\Delta t=5 \times 10^{-7}$ s ve $\Delta t=5 \times 10^{-6}$ s adım uzunluğu değerleriyle gerçekleştirilen simülasyonlarda dalga formlarında herhangi bir bozulma gözlemlenmemiş; $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s için elde edilen grafiklerle tam uyum sağlandığı tespit edilmiştir. Söz konusu model için ATP-EMTP simülasyonlarında ilk belirgin sapma $\Delta t=5 \times 10^{-3}$ s adım uzunluğunda ortaya çıkmaktadır.

Farklı adım uzunluklarında durum-uzayı yönteminden elde edilen akım dalga formları ise aşağıdaki verilmiştir. Şekil 7'de sunulan durum-uzayı yöntemi sonuçları incelendiğinde, 3. ve 5. milisaniyeler civarındaki akım dalga formlarında küçük ölçekli farklılıkların oluştuğu görülmektedir. ATP-EMTP simülasyonlarında aynı adım uzunluğu değerleri için herhangi bir sapma gözlemlenmemesine karşın durum-uzayı yönteminde dalga formunda değişiklikler meydana geldiği dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, adım uzunluğunun daha da artırılması durumunda bu küçük farklılıkların yerini daha belirgin ve kapsamlı bozulmalara bırakacağı öngörülmektedir.



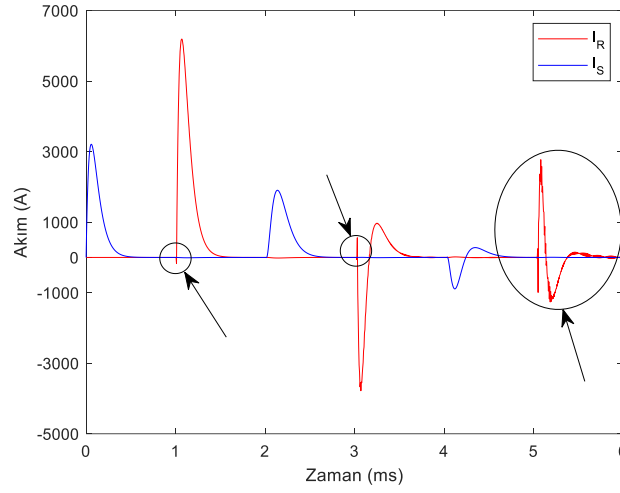
(a)



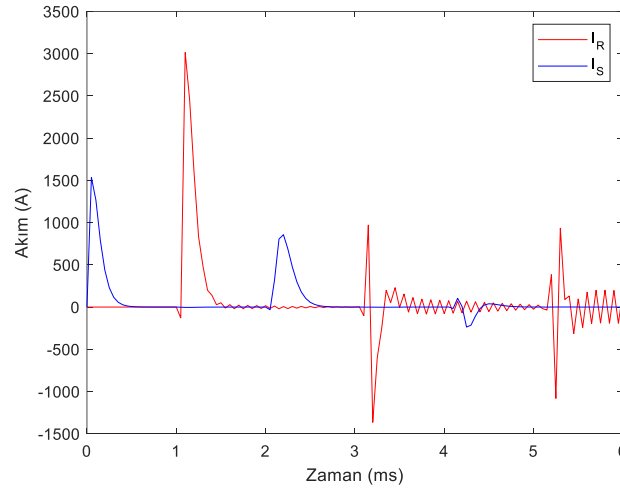
(b)

Şekil 7. Durum-uzayı akım dalga formları (a) $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s, (b) $\Delta t=5 \times 10^{-7}$ s.

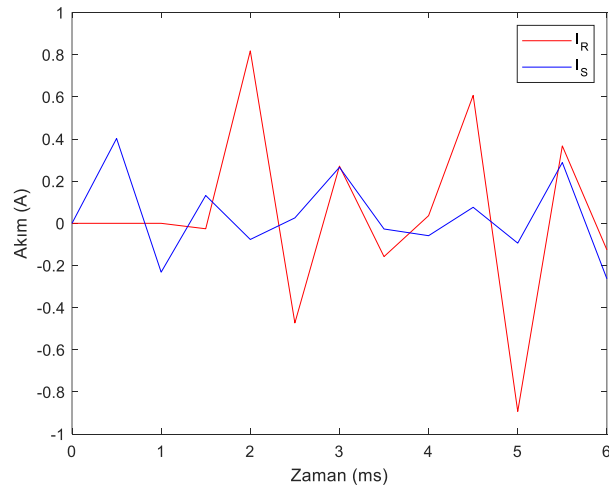
Aşağıda, durum-uzayı yöntemi kullanılarak daha büyük adım uzunluğu değerlerine karşılık gelen akım dalga formları elde edilmiştir.



(a)



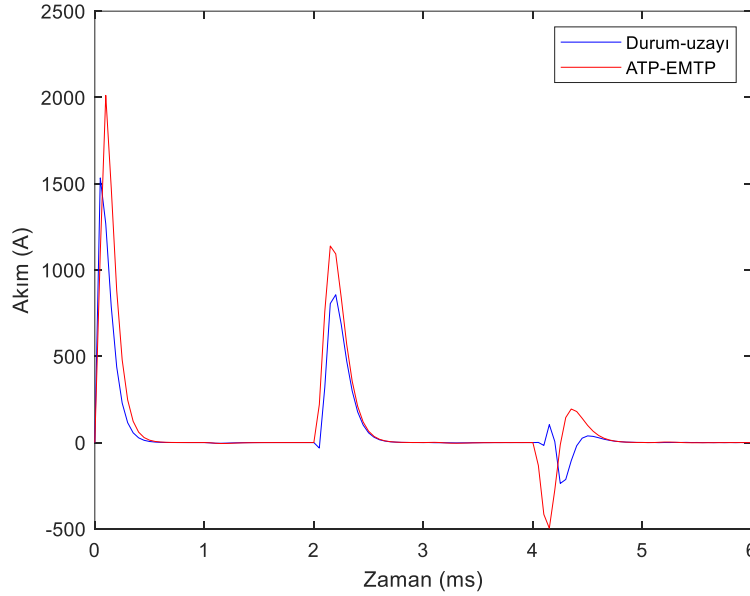
(b)



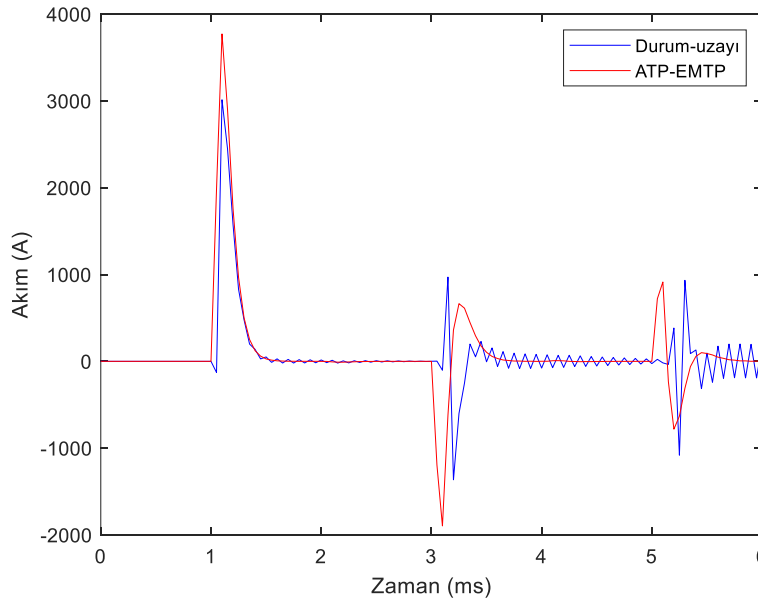
(c)

Şekil 8. Durum-uzayı akım dalga formları (a) $\Delta t=5 \times 10^{-6}$ s, (b) $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s, (c) $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.

Şekil 8'e göre, ATP-EMTP simülasyonlarında elde edilen bulgularla paralel biçimde, adım uzunluğunun artmasına bağlı olarak akım profillerinde giderek belirginleşen bozulmaların meydana geldiği görülmektedir. Adım uzunluğundaki artışın akım tepe değerleri üzerinde de kayda değer sapmalar oluşturduğu saptanmıştır. $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s adım uzunluğunda akım tepe değerlerinin 1 A gibi gerçeklikten uzak seviyelerin altına gerilediği gözlemlenmektedir. Akım değerlerinin kA mertebesinde A mertebesine düşmesinin temel nedeni, sayısal entegrasyon sürecinde doğruluğu doğrudan etkileyen adım uzunluğunun hatalı biçimde seçilmesidir. Aynı adım uzunluğu değerleri kullanılarak farklı yöntemlerle elde edilen karşılaştırmalı grafikler aşağıda sunulmaktadır.



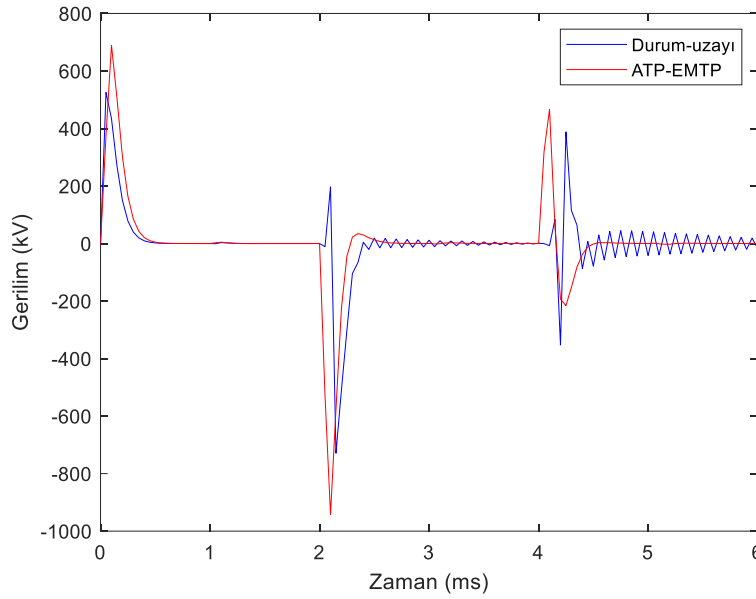
Şekil 9. Yıldırımın düştüğü noktadaki akım dalga formları $\Delta t=5 \times 10^{-5}$.



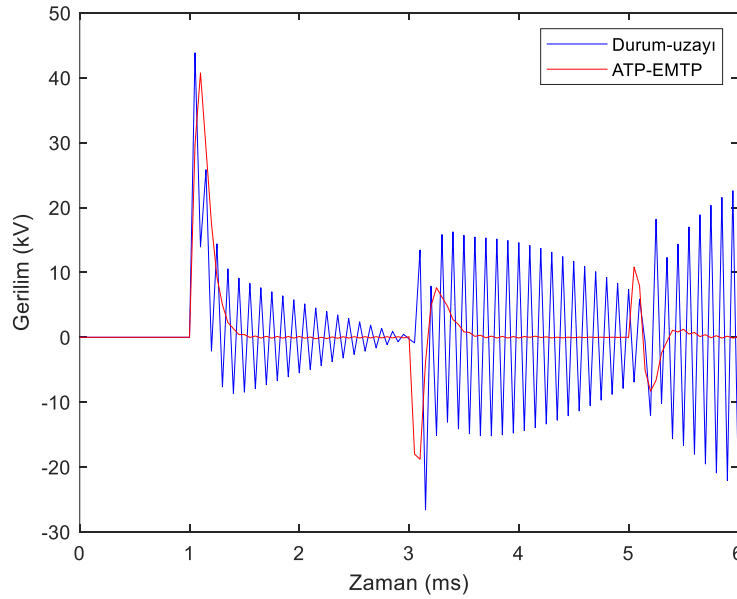
Şekil 10. Transformör primer terminali akım dalga formları $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.

Şekil 9 ve Şekil 10 birlikte değerlendirildiğinde, adım uzunluğunun $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s olması durumunda durum-uzayı yönteminden elde edilen tepe değerleri ile ATP-EMTP simülasyonlarından elde edilen sonuçlar arasında belirgin farklılıklar bulunduğu görülmektedir. Bu farklılık özellikle Şekil 10 üzerinde daha açık biçimde gözlemlenmekte olup durum-uzayı yöntemiyle elde edilen akım dalga formunun 3. milisaniyeden itibaren salınım davranışı sergilediği, buna karşın ATP-EMTP dalga formunda herhangi bir salınımın oluşmadığı tespit edilmiştir.

Aynı adım uzunluğu değeri kullanılarak farklı yöntemlerle elde edilen gerilim dalga formları ise aşağıda karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

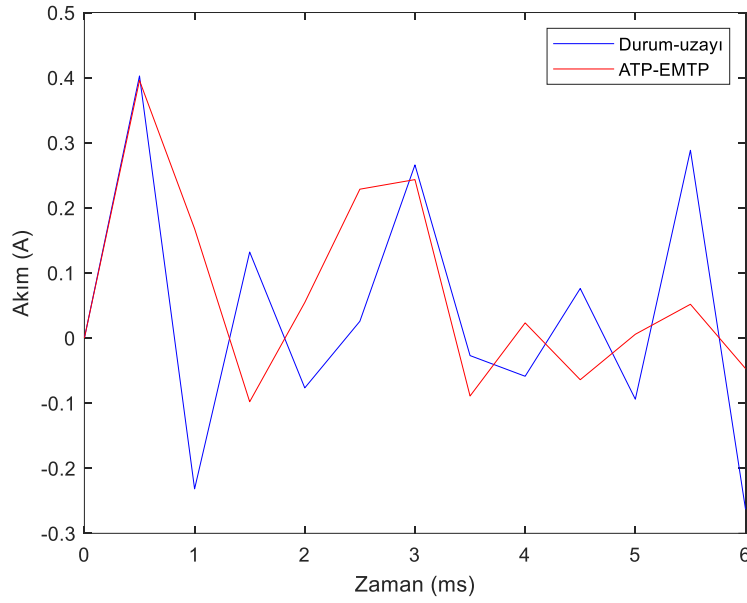


Şekil 11. Yıldırımın düştüğü noktadaki gerilim dalga formları $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.

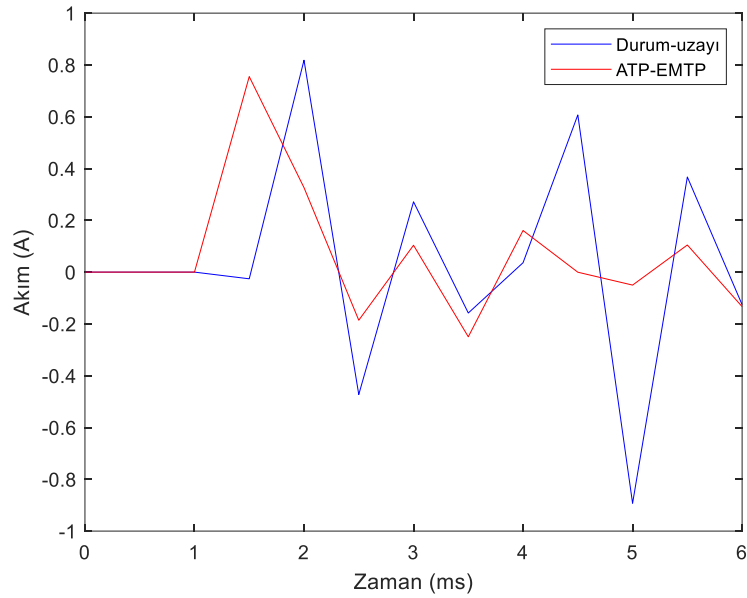


Şekil 12. Transformatör primer terminali gerilim dalga formları $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.

Şekil 11 ve Şekil 12 gerilim grafikleri incelendiğinde, durum-uzayı yöntemiyle elde edilen dalga formunun belirgin salınım davranışı sergilediği görülmektedir. Karşılaştırmalı değerlendirme neticesinde her iki yöntemden elde edilen sonuçlar arasında kayda değer farklılıkların mevcut olduğu ortaya konulmuştur. Adım uzunluğunun farklı yöntemler üzerindeki etkisini daha açık biçimde ortaya koyabilmek amacıyla $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s değerine karşılık gelen akım dalga formları aşağıda verilmiştir.

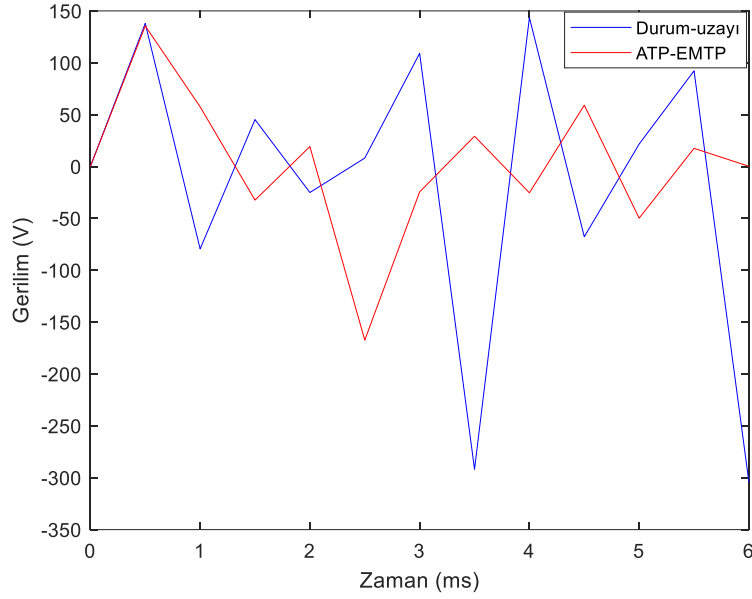


Şekil 13. Yıldırımın düştüğü noktadaki akım dalga formları $\Delta t=5 \times 10^{-4}$.

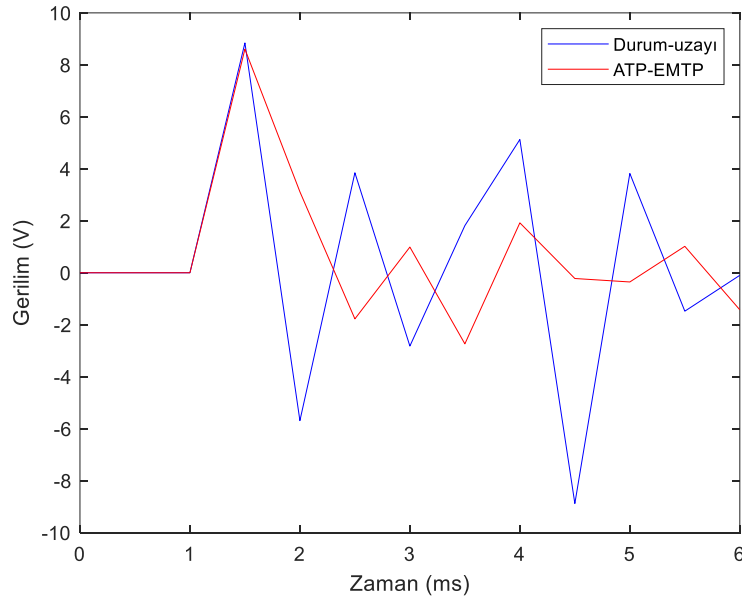


Şekil 14. Transformör primer terminali akım dalga formları $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.

Şekil 13 ve Şekil 14'te verilen akım profiller incelendiğinde, her iki yöntemden elde edilen dalga formlarının birbirinden tümüyle ayrıştığı ve fiziksel gerçeklikten önemli ölçüde uzaklaşan sonuçlar ürettiği açıkça görülmektedir. Aynı adım uzunluğu değeri için her iki yöntemden elde edilen gerilim grafikleri ise aşağıda karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 15. Yıldırımın düştüğü noktadaki gerilim dalga formları $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.



Şekil 16. Transformör primer terminali gerilim dalga formları $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.

Şekil 15 ve Şekil 16 incelendiğinde, adım uzunluğunun artmasıyla birlikte simülasyon sonuçlarının gerçek dalga formlarından giderek uzaklaştığı açıkça görülmektedir. Özellikle aşırı büyük adım uzunluğu değerlerinde fiziksel gerçeklikle bağdaşmayan akım ve gerilim verilerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Bu durum sayısal kararsızlığa, çözüm hassasiyetinin yitirilmesine ve elde edilen sonuçların fiziksel anlam taşımaz hale gelmesine yol açmaktadır. ATP-EMTP programı, kapasitans ve endüktans elemanlarına ait diferansiyel denklemleri akım kaynakları ve karakteristik empedans üzerinden modellemekte; bu süreçte trapezoidal entegrasyon kuralından yararlanmaktadır. Buna karşın bu çalışmada devre parametreleri analitik yollarla modellenmiş, durum denklemlerinin sayısal çözümünde ise yine trapezoidal kural benimsenmiştir. Geçici rejim analizlerinde daha küçük adım uzunluğu seçilmesinin daha doğru, daha gerçekçi ve daha hassas sonuçlar elde edilmesini doğrudan beraberinde getireceği değerlendirilmektedir. Adım uzunluğunun küçültülmesinin toplam simülasyon süresini uzatması bir dezavantaj olarak öne çıkmaktadır. Ancak bir güç sisteminin dinamik davranışının doğru biçimde modellenmesi ve sistemin güvenilir biçimde tasarlanabilmesi gözetildiğinde, bu dezavantajın kabul edilebilir sınırlar dahilinde kaldığı söylenebilir.

6. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, zaman adım uzunluğunun güç sistemlerindeki geçici rejimlerin analizindeki etkisini göstermek adına farklı zaman adım uzunlukları için ATP-EMTP programı ve durum-uzayı yöntemiyle geçici rejim simülasyonları yapılmıştır. Bu uygulamalar sonucunda, her iki yöntemde de adım uzunluğunun artırılmasının sonuçlar üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Akım-gerilim profilleri incelendiğinde gerek dalga formları gerekse dalga tepe değerlerinde ciddi değişimler meydana gelmiştir. Daha büyük adım aralığı gerçekçi olmayan daha kötü sonuçlar vermiştir. Zaman adım uzunluğu küçüldükçe gerçeğe daha yakın akım-gerilim profillerinin elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Her iki yöntemde büyük değerlerdeki eşit zaman adım uzunluğunda farklı sonuçların elde edilmesinin sebebi, sayısal entegrasyonun yapıldığı yer olduğu düşünülmektedir. ATP-EMTP programı, kapasitans ve endüktans elemanlarını eşdeğer akım kaynağı ve direnç olarak temsil etmekte; bu dönüşüm işleminde trapezoidal entegrasyon kuralını esas almaktadır. Buna karşın bu çalışmada devre parametreleri analitik ifadeler aracılığıyla modellenmiş olup sistem denklemlerinin sayısal çözüm sürecinde trapezoidal kural kullanılmıştır. Zaman adım uzunluğunun doğru belirlenmesi güç sistemlerindeki geçici rejim analizlerinin daha sağlıklı yapılmasına imkân sağlayacaktır. Aksi takdirde güç sistemlerinin tasarımında, koruma elemanlarının seçiminde hatalara sebep olacaktır. Zaman adım uzunluğunun hatalı seçilmesi durumunda arıza başlangıcı, anahtarlama olayları, gerilim çökmesi ve akım darbeleri yeterince hassas temsil edilemeyecektir. Sonuç olarak zaman adımı uzunluğu, güç sistemi simülasyonlarında çözüm doğruluğu, sayısal kararlılık ve hesaplama maliyeti arasındaki dengeyi belirleyen temel parametrelerden biridir. Büyük zaman adımları hesaplama süresini azaltırken sayısal hata miktarını artırmakta; küçük zaman adımları ise daha doğru sonuçlar üretmekle birlikte hesaplama yükünü önemli ölçüde yükseltmektedir.

KAYNAKÇA

- Abourida, S., Bélanger, J., & Jalili-Marandi, V. (2016). *Real-time power system simulation: EMT vs. phasor*. OPAL-RT Technologies.
- Adamczyk, B., Pajak, P., & Florkowski, M. (2024). Comparison of initial voltage distributions in layer and disc type power transformer windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 32(1), 73–82. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2024.3473893>
- Bergeron, L. (1961). *Water hammer in hydraulics and wave surges in electricity*.
- Bilal, G., Gomez, P., Salcedo, R., & Villanueva-Ramirez, J. M. (2019). Electromagnetic transient studies of large distribution systems using frequency domain modeling methods and network reduction techniques. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 110, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.043>
- Branin, F. H. (1967). Transient analysis of lossless transmission lines. *Proceedings of the IEEE*, 55(11), 2012–2013. <https://doi.org/10.1109/PROC.1967.6033>
- Chaban, A., Popenda, A., & Szafraniec, A. (2023). Including shield wires in the analysis of transient processes. *Energies*, 16, 1–20. <https://doi.org/10.3390/en16237870>
- Colqui, J. S. L., De Araújo, A. R. J., & Kurokawa, S. (2019). Improving the performance of a lumped transmission line model used in electromagnetic transient analysis. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13(21), 4942–4951. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6301>
- Dommel, H. (1969). Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88(4), 388–399. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1969.292459>
- Dommel, H. (1992). *EMTP theory book* (2nd ed.). Microtran Power System Analysis Corporation.
- Ghiasi, S. M. S., Abedi, M., & Hosseini, S. H. (2022). A new approach for the estimation of transient voltage profile along transmission line. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 40(4), 295–302. <https://doi.org/10.1109/cjece.2017.2763988>

- Ghorbal, M. B., Mirzaei, H. R., & Rahimpour, E. (2024). Precise modeling of chopped lightning impulse test of power transformers. *Electric Power Systems Research*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110207>
- Heidler, F., & Cvetić, J. (2002). A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front. *European Transactions on Electrical Power*, 12(2), 141–150. <https://doi.org/10.1002/etep.4450120209>
- Heidler, F., Cvetić, J. M., & Stanić, B. V. (1999). Calculation of lightning current parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(2), 399–404. <https://doi.org/10.1109/61.754080>
- Jaimis Colqui, S. L., Anderson De Araujo, R. J., & Kurokawa, S. (2018). A new methodology for calculating electromagnetic transients in transmission lines. In *INDUSCON 2018- Proceedings. 13th IEEE International Conference on Industry Applications* (pp. 949–954). <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627286>
- Jurišić, B., Jurković, Z., Župan, T., & Marković, M. (2024). Hybrid analytical-FEM approach for power transformer transient analysis. *Journal of Energy - Energija*, 73(1), 8–13. <https://doi.org/10.37798/2024731512>
- Kurokawa, S., Yamanaka, F. N. R., Prado, A. J., & Pissolato, J. (2009). Inclusion of the frequency effect in the lumped parameters transmission line model: State space formulation. *Electric Power Systems Research*, 79(7), 1155–1163. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.02.007>
- Ma, X., Zhang, N., Zhou, X., He, Z., Wang, Y., & Wang, S. (2024). Calculation of lightning impulse voltage distribution of voltage transformer. In *Proceedings of 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference, CIEEC 2024* (pp. 1256–1261). <https://doi.org/10.1109/CIEEC60922.2024.10583604>
- Mamiş, M. S., Kaygusuz, A., & Köksal, M. (2010). State variable distributed-parameter representation of transmission line for transient simulations. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 18(1), 31–42. <https://doi.org/10.3906/elk-0905-2>
- Samal, M., & Mondal, M. (2022). Estimation of a disk transformer winding's ladder network parameters using analytical, FEM, and terminal measurements. In *2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference, NKCon 2022* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/NKCon56289.2022.10126684>
- Samal, M., & Mondal, M. (2023). Power transformer FRA studies using ladder, multi-conductor transmission lines (MTL), circular MTL, and hybrid winding models. In *2023 IEEE 8th International Conference for Convergence in Technology, I2CT 2023* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/I2CT57861.2023.10126461>
- Vahabzadeh, T., Ebrahimi, S., & Jatskevich, J. (2025). Discretized impedance-based modeling of converter-interfaced energy resources for state-variable-based real-time EMT simulators. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 6, 212–227.

*Bu yayın doktora tezinden üretilmiştir.