

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Jeomanyetik Olayların Senkron Generatörlerin Termal Kapasitesi ve Performansı Üzerindeki Etkilerinin Analizi

Analysis of the Effects of Geomagnetic Events on the Thermal Capacity and Performance of Synchronous Generators

Şevket Cantürk^{1,*}, Oktay Karakaya²

¹ Balıkesir Üniversitesi, Sındırgı Meslek Yüksek Okulu, Sındırgı, Balıkesir, Türkiye.

² Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksek Okulu, Bigadiç, Balıkesir, Türkiye.

Geliş / Received: 11.12.2024

Kabul / Accepted: 17.12.2024

*Sorumlu Yazar: Şevket Cantürk scanturk@balikesir.edu.tr

ÖZ: Bu çalışmada, jeomanyetik fırtınalar sonucunda enerji iletim sistemlerinde oluşan jeomanyetik indüklenen akımların (JİA), senkron generatörlerin performans parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan test sistemiyle farklı topraklama direnci ve JİA seviyeleri altında parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerden, JİA'ların generatör yükseltme transformatörlerinde (GYT'lerinde) doyuma neden olarak mıknatıslanma akımlarının harmonik bileşenlerinde ve reaktif güç talebinde artışa yol açtığı görülmüştür. Bu durumun, senkron generatör rotorlarında aşırı ısınma, alan sargılarında izolasyon bozulması, kayıp artışı gibi termal ve yapısal sorunlara sebep olabileceği ifade edilebilir. Bununla birlikte, düşük topraklama direncinin harmonik bozulmaları ve reaktif güç talebini artırdığı, yüksek topraklama direncinin ise bu etkileri sınırladığı anlaşılmıştır. Ayrıca, zaman gereksinimi olan detaylı simülasyonların yerine Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak geliştirilen matematiksel modeller ile JİA etkilerinin hızlı, güvenilir ve yüksek doğrulukla öngörülebileceği ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar, eşdeğer negatif sıra akımı (I_{2eq}), toplam harmonik bozulma (THDI_G) ve reaktif güç talebi (Q_1) gibi temel performans parametrelerinin, JİA seviyesi ve topraklama direnci ile olan ilişkilerinin istatistiksel olarak anlamlı biçimde modellenbildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeomanyetik indüklenen akımlar, senkron generatörler, generatör yükseltme transformatörleri, termal kapasite, yanıt yüzeyi yöntemi

ABSTRACT: In this study, the effects of geomagnetically induced currents (GICs), which occur in power transmission systems as a result of geomagnetic storms, on the performance parameters of synchronous generators were investigated. Parametric analyses were carried out under different grounding resistance values and GIC levels using a test system developed in the MATLAB/Simulink environment. The analyses revealed that GICs cause magnetic saturation in generator step-up transformers (GSUs), leading to increased harmonic components of magnetizing currents and elevated reactive power demand. This condition may result in thermal and structural issues such as rotor overheating, insulation degradation in field windings, and increased losses in synchronous generators. Furthermore, it was observed that low grounding resistance significantly amplifies harmonic distortion and reactive power demand, whereas higher resistance values help mitigate these effects. Additionally, instead of time-consuming detailed simulations, mathematical models were developed using the Response Surface Methodology (RSM) to enable fast, reliable, and highly accurate predictions of GIC impacts. The results demonstrated that key performance parameters such as equivalent negative sequence current (I_{2eq}), total harmonic distortion of generator current (THDI_G), and reactive power demand (Q_1) can be statistically modeled with respect to GIC levels and grounding resistance.

Keywords: Geomagnetically induced currents, synchronous generators, generator step-up transformers, thermal capacity, response surface methodology

1. GİRİŞ

Güneş'te meydana gelen şiddetli patlamalar, Dünya'nın jeomanyetik alanında bozulmalara yol açarak güneş fırtınalarına neden olabilir [1, 2]. Bu bozulmalar, enerji nakil hatlarında pratikte doğru akım (DA) kabul edilebilecek kadar düşük frekanslı (0.001 ila 0.1 Hz arasında) gerilimlerin indüklenmesine yol açar [3-4]. Söz konusu gerilimler, iletim hattı tarafındaki transformatörlerin yıldız noktalarının topraklanması durumunda [3, 5], jeomanyetik olarak indüklenen akımlar (JİA) olarak adlandırılan yaklaşık doğru akımların akışına sebep olur [6, 7]. Literatürde yapılan çalışmalar [8-11], JİA etkisi altındaki transformatörlerin, doğru akımın yönüne bağlı olarak pozitif veya negatif alternansta doyuma girdiklerini göstermektedir. Bu durum, transformatörlerin aşırı uyartım akımları çekmesine, reaktif güç taleplerinin artmasına ve kayıpların yükselmesine neden olmaktadır.

Benzer şekilde, senkron generatörler de JİA'ların olumsuz etkilerine maruz kalmaktadır [12-17]. Üçgen-yıldız bağlı generatör yükseltme transformatörleri (GYT) üzerinden şebekeye bağlanan bu generatörlerde, JİA'ların GYT üzerinde doyuma neden olması reaktif güç talebini artırmakta ve harmonik bozulmalara yol açmaktadır [12-15]. GYT'nin üçgen bağlı alçak gerilim sargıları sıfır sıra akımlarını engellese de pozitif ve negatif sıra akımları stator sargılarında akmaya devam etmektedir [12, 13]. Bu durum, rotor yüzeyinde girdap akımları oluşması, aşırı ısınma, alan sargılarında yalıtım bozulması ve mekanik hasarlara yol açmaktadır [13, 14]. Ayrıca, artan reaktif güç talebi generatörün reaktif güç üretim sınırına ulaşmasına ve sistem gerilimini düzenleme kapasitesinin azalmasına neden olabilmektedir [14, 16].

JİA'ların doğru akıma (DA) çok yakın yapısı nedeniyle güç şebekelerinde JİA modellemesi üç parametreye dayanır: (i) iletim hatlarının birim uzunluktaki DC dirençleri, (ii) trafo sargılarının DC dirençleri ve (iii) trafo merkezlerinin topraklama dirençleri [18-20]. Trafo merkezi topraklama direnci genellikle kesin olarak bilinmemekle birlikte [21, 22], IEEE 81-1983 [23] ve 81.2-1991 [24] standartlarında açıklanan yöntemlerle hesaplanabilir. Bu direnç, toprak yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [21, 25, 26] ve

literatürde genellikle 0.05 ile 1.5 ohm arasında olduğu belirtilmiştir [22].

1.1 Motivasyon

Önceki bölümde bahsedildiği üzere, transformatörlerin ve senkron generatörlerin JİA etkisi altındaki performansları, güç sistemlerinin güvenilirliği açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır. JİA'lar, GYT'lerin doyuma ulaşmasına neden olarak senkron generatörlerde hem harmonik bozulmaların artmasına hem de termal kapasite sınırlarının aşılmasına yol açmaktadır [14, 27]. Bu etkilerin temel nedeni, GYT'lerin yüksek gerilim sargılarının doğrudan topraklanmış olmasıdır [3-5]. Bu durum, JİA'ların iletim hattı üzerinden güç sistemine kolayca akmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda, trafo merkezlerindeki topraklama direnci, JİA'ların sistem üzerindeki etkilerini belirlemede kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde, JİA'nın GYT ve senkron generatörler üzerindeki etkileri ele alınmış olsa da, özellikle topraklama direnci gibi sistem parametreleri ile JİA seviyeleri arasındaki etkileşimler kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir. Bunun yanı sıra, bu tür etkilerin hızlı ve etkili bir şekilde tahmin edilmesini sağlayacak yöntemlere duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu sebeple, çalışmada JİA'nın senkron generatör performansı üzerindeki etkilerinin zaman verimli bir şekilde öngörülmesini sağlamak amacıyla Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak matematiksel bir model önerilmiştir.

1.2 Özgün Değer

Bu çalışma, JİA etkilerinin senkron generatör performansı üzerindeki etkilerini anlamak için kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Çalışmada; JİA'nın GYT üzerinde manyetik doyuma neden olduğu ve bu durumun generatörlerde harmonik bozulmaları artırarak termal kapasite sınırlarına ulaşılmasına yol açabileceği gösterilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen parametrik analizlerle, farklı topraklama direnci değerleri ve JİA seviyelerinin sistem üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak, JİA ve sistem parametreleri arasındaki karmaşık etkileşimler matematiksel modellerle ifade edilmiş ve JİA

koşullarında generatör performansının hızlı ve yüksek doğrulukla tahmin edilmesi sağlanmıştır.

1.3 Makale İçeriği

Bu makale beş bölümden oluşmaktadır. Bölümlerin içeriği kısaca şu şekilde açıklanabilir: Bölüm II’de, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan test sistemi tanıtılmış ve sistem elemanlarının modellenmesi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bölüm III’de, generatör yükseltme transformatörlerinin JİA koşullarındaki davranışı analiz edilmiştir. Analizler, GYT’nin manyetik doyuma girerek uyarım akımlarında ve harmonik bozulmalarda artışa neden olduğunu ortaya koymuş, bu etkilerin topraklama direncine bağlı olarak nasıl değiştiği detaylandırılmıştır. Bölüm IV’de, senkron generatörlerin performansı incelenmiştir. JİA’nın, generatör stator akımı harmonik bozulmasını artırarak rotor yüzeyinde aşırı ısınmaya neden olduğu ve termal kapasite sınırlarına ulaştığı tespit edilmiştir. Bu etkiler IEEE Standartları C50.12-2005 [28] ve C50.13-2014 [29] çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bölüm V’de, Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak matematiksel tahmin modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller, JİA ve topraklama direnci seviyelerine bağlı olarak sistem davranışlarının hızlı ve doğru bir şekilde öngörülmesini sağlamıştır. Son olarak, Bölüm VI’da, çalışmanın temel bulguları özetlenmiştir. Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak, JİA ve sistem parametreleri arasındaki karmaşık etkileşimler matematiksel modellerle ifade edilmiş ve JİA koşullarında generatör performansının hızlı ve yüksek doğrulukla tahmin edilmesi sağlanmıştır.

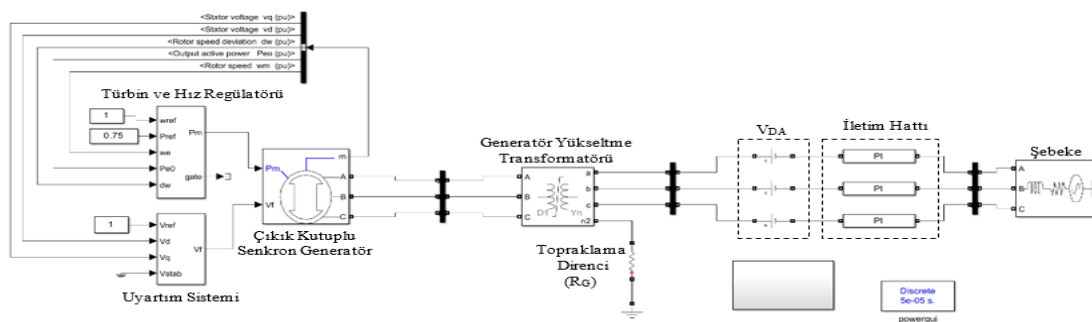
2. TEST SİSTEMİNİN OLUŞTURULMASI

Analizler sırasında, Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan test sistemi Şekil 1’de sunulmuştur. Bu

test sisteminde, jeomanyetik bozulmalar nedeniyle iletim hattı üzerinde indüklenen DA gerilimlerini temsil etmek için DA gerilim kaynakları kullanılmıştır. Parametrik analizlerde, jeomanyetik bozulmalar sırasında iletim hattında kilometre başına düşen DA gerilim düşümü (VDA) değerinin 0-5 V/km arasında değiştiği ve bu aralığın [30, 31]'de rapor edilen değerlere uygun olduğu belirtilmelidir. Ayrıca, transformatör nötr noktası topraklama direnç değeri (RG) 2 Ω 'a kadar artırılmıştır.

2.1 Senkron Generatörün Modellenmesi

Senkron makine bloğu, türbin ve hız regülatörü sisteminden gelen mekanik gücün işaretine bağlı olarak generatör veya motor modunda çalıştırılabilir. Eğer giriş mekanik gücü pozitifse, senkron makine generatör olarak çalışır. Eğer mekanik güç girişi negatifse, senkron makine motor olarak çalışır. Şekil 1'den görüldüğü üzere, senkron makine generatör olarak çalışmaktadır ve bu nedenle makineye pozitif bir mekanik güç sağlanması gerekmektedir. Makinenin elektriksel kısmı, [32]'de gösterilen eşdeğer devreler kullanılarak d-q eksen referans çerçevesinde analiz edilebilir. MATLAB/Simulink tarafından senkron makineyi modellemek için kullanılan eşdeğer devre, IEEE 1110 [33] tarafından önerilene benzer olduğu ifade edilmelidir. Seçilen model bloğunda, rotor tipi çıkık kutuplu (salient-pole) olarak belirlenmiş olup, parametreler menüsünde detaylı olarak sunulmuştur. Uyarım sistemi olarak ise, günümüz modern güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan IEEE Tip-1 uyarım sistemi tercih edilmiştir [34]. Bu uyarım sistemi, sürekli çalışan bir gerilim regülatörüne sahip DC komütatör uyarıcı kullanır ve doyma fonksiyonunu içermemektedir.



Şekil 1: Matlab/Simulink programında oluşturulan test sistemi.

2.2 Güç Transformatörünün Modellenmesi

Test sisteminde 3 fazlı 5 bacaklı transformatör tipi dikkate alınmıştır. MATLAB/Simulink'de üç fazlı transformatör bloğunu kullanmak için belirli parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Bu parametreler arasında güç ve gerilim seviyeleri, transformatör sargı empedansı, mıknatıslama direnci ve transformatörün mıknatıslama eğrisi (B-H eğrisi olarak da adlandırılır) bulunmaktadır. Ayrıca, transformatör bağlantı tipi üçgen/yıldız (yüksek gerilim sargıları topraklı) olarak belirlenmiştir. Seçilen transformatör model bloğunun parametreler menüsü, ekler kısmında sunulmuştur.

2.3 İletim Hattının Modellenmesi

Hat uzunluğu, bir güç sisteminde akan JİA seviyesinin belirlenmesinde önemlidir. Bu çalışmada, analiz sistemindeki enerji iletim hattı, Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan hazır bloklar kullanılarak 100 km'lik orta uzunluktan ve π eşdeğer modeli ile modellenmiştir. Tüm fazlar, dengeli bir iletim hattı oluşturacak şekilde aynı direnç ve endüktans değerleriyle modellenmiştir. Seçilen iletim hattının direnç, endüktans ve kapasitans değerleri sırasıyla 0.01273 Ω /km, 933.7 mH/km, 12.74 nF/km olarak belirlenmiştir.

3. JİA AKIŞININ GYT'YE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, 210 MVA güç değerine, 13.8/230 kV dönüşüm oranına ve üç fazlı, beş bacaklı kabuk tipi bir nüveye sahip generatör yükseltme transformatörünün JİA'lar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.1 Uyarım Akımı Harmonik Bozulması

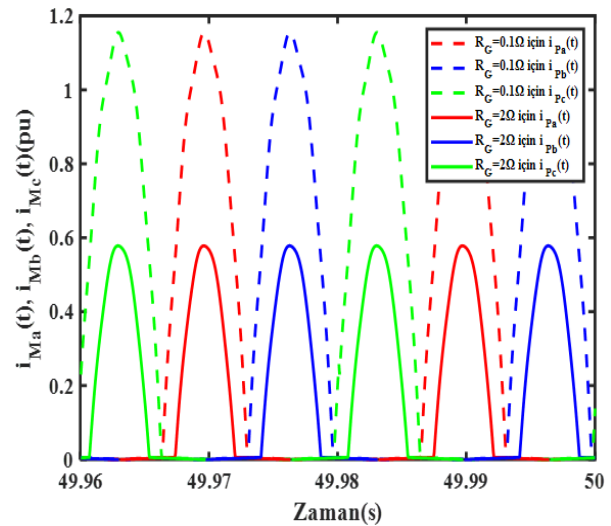
V_{DA} 'nın 5 V/km olduğu durum için GYT mıknatıslama akımlarının ($i_{Ma}(t)$, $i_{Mb}(t)$, $i_{Mc}(t)$) anlık değişimleri Şekil 2'de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, uygulanan V_{DA} seviyesinin etkisiyle, transformatörün pozitif alternansta doyuma girmesi nedeniyle mıknatıslama akımlarının tepe değerlerinde belirgin bir artış olduğu görülmüştür. Ayrıca, aynı grafikten topraklama direnci (R_G) değerindeki artışın uyarım akımları üzerindeki etkisi de açıkça gözlemlenmektedir. R_G değerinin artmasıyla uyarım akımlarının tepe değerlerinde azalma

meydana gelmiştir. R_G 'nin 0.1 Ω olduğu durumda uyarım akımlarının tepe değeri 1.18 pu olarak ölçülürken, R_G 'nin 2 Ω olması durumunda bu değerin 0.58 pu seviyesine düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, topraklama direncindeki artışın, transformatörün JİA altında doyuma girmesini sınırladığı şeklinde yorumlanabilir.

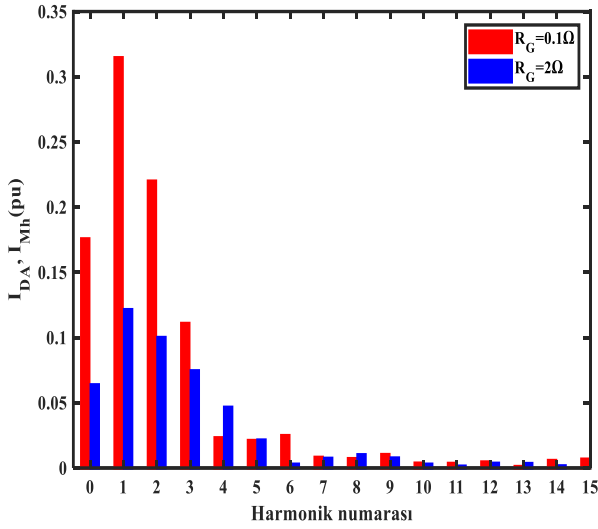
Şekil 3'de, V_{DA} 'nın 5 V/km olduğu durumda, mıknatıslama akımlarının DA ve harmonik bileşenlerinin (I_{PDA} ve I_{Mh}) farklı topraklama direnci değerlerine göre değişimleri sunulmuştur. Grafik, $R_G=0.1 \Omega$ durumunda temel bileşen ve düşük mertebeli harmonik bileşenlerin (özellikle 2. ve 3. harmonikler) oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, $R_G=2 \Omega$ durumunda harmonik genliklerinin genel olarak daha düşük olduğu görülse de, belirli harmoniklerde $R_G=2 \Omega$ 'un $R_G=0.1 \Omega$ 'a kıyasla daha yüksek değerlere sahip olduğu ifade edilebilir (örneğin, 4. ve 8. harmonikler).

3.2 Reaktif Güç Talebi Artışının Hesaplanması

Analizlerde, transformatörün alçak gerilim tarafındaki temel harmonik faz-nötür gerilimlerinin ve temel harmonik faz akımlarının etkin değerleri (V_{Pm1} ve I_{Pm1}) ile bu gerilim ve akımlar arasındaki faz farkı (θ_{Pm1}), denklem (1)'de yer alan ifadelerle göre kullanılarak transformatörün toplam reaktif güç talebi hesaplanmıştır.



Şekil 2: GYT'nin JİA koşulları altında ($V_{DA}=5$ V/km), $R_G=0.1$ ve 2 Ω için mıknatıslama akımlarının dalga şekilleri.



Şekil 3: GYT'nin JİA koşulları altında ($V_{DA}=5$ V/km), $R_G=0.1$ ve 2Ω için mıknatıslanma akımlarının harmonik bileşenleri.

$$Q_{m1} = V_{Pm1} I_{Pm1} \sin(\theta_{Pm1}) \quad m=a,b,c \quad \text{fazları} \quad (1)$$

Transformatörün toplam reaktif güç talebi ise Denklem (2) ile elde edilmiştir:

$$Q_1 = \sum_{m=a,b,c} Q_{m1} \quad (2)$$

Transformatörün alçak gerilim tarafındaki faz akımlarının, temel harmonik ve diğer harmonik bileşenler göz önünde bulundurularak hesaplanan toplam efektif değeri, (3) numaralı denklemde verilmiştir:

$$I_{Pm} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{Pm}^2 dt} \quad (3)$$

Bu denklemde yer alan $i_{Pm(t)}$, alçak gerilim sargı akımlarının anlık değerlerini temsil eder ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$i_{Pm}(t) = I_{PDA} + \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2} I_{ph} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{ph}) \quad (4)$$

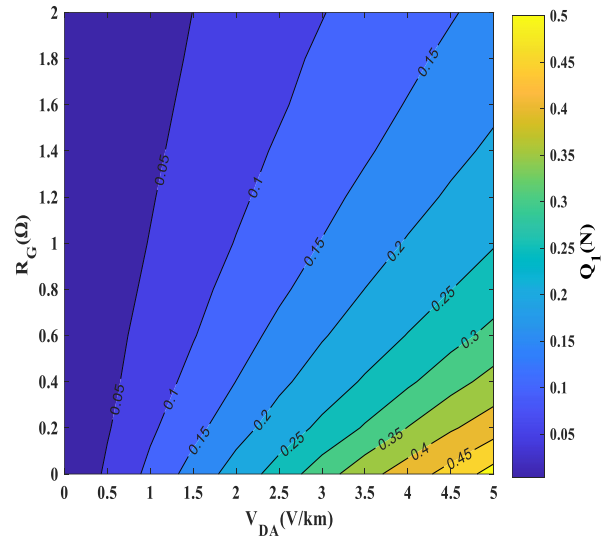
Bu denklemde, T periyot, ω_0 temel açısal frekans, h harmonik numarası, I_{DA} ve I_{ph} sırasıyla alçak gerilim sargı akımının doğru akım ve h . harmonik bileşenlerini, φ_{ph} ise alçak sargı akımının h . harmonik bileşenlerinin faz açılarını temsil eder.

Topraklama direnci (R_G) ve V_{DA} seviyesindeki değişimlerin transformatörün toplam reaktif güç talebi (Q_1) üzerindeki etkileri Şekil 4'te

gösterilmektedir. Düşük topraklama direnci durumunda, V_{DA} 'nın artışı reaktif güç talebinde belirgin bir yükselmeye neden olmaktadır. Örneğin, $V_{DA}=1$ V/km seviyesinde reaktif güç talebi yaklaşık 0.1 pu olarak hesaplanırken, $V_{DA}=5$ V/km seviyesinde bu değer 0.45 pu'ya ulaşmıştır.

Bunun aksine, yüksek topraklama direnci ($R_G=2 \Omega$) durumunda aynı V_{DA} seviyeleri için Q_1 'de önemli bir azalma gözlemlenmiştir. $V_{DA}=5$ V/km seviyesinde reaktif güç talebi yaklaşık 0.15 pu'ya düşmüş ve bu, düşük dirençli duruma kıyasla yaklaşık %66'lık bir azalmayı ifade etmektedir.

Öte yandan, topraklama direncindeki artışın düşük V_{DA} seviyelerinde reaktif güç talebine olan etkisi sınırlı kalırken, V_{DA} 'nın artışıyla birlikte bu etkinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Başka bir ifadeyle, yüksek R_G değerleri, V_{DA} 'ya bağlı olarak oluşan reaktif güç talebindeki artışı sınırlamakta ve sistemin daha kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 4: Transformatör reaktif güç talebinin V_{DA} ve R_G ile değişimi.

4. JİA KOŞULLARINDA GENERATÖR TERMAL KAPASİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Senkron generatörlerde stator harmonik akımlarının artışının, rotorun aşırı ısınmasına neden olabileceği daha önce açıklanmıştır. Bu tür bir aşırı ısınma, generatörün rotor bileşenlerinde yapısal hasara yol açarak sistem performansı ve güvenilirliği açısından ciddi bir risk oluşturabilir.

Bu nedenle, harmonik akımların generatör üzerindeki etkilerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu bağlamda, bu bölümde öncelikle JİA'ların etkisiyle stator akımında meydana gelen harmonik bozulmalar analiz edilecektir. Ardından, elde edilen sonuçlar IEEE Standartları C50.12-2005 [28] ve C50.13-2014'e [29] göre değerlendirilecek; harmonik akımların rotor ısınmasına olan etkileri detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Bu standartlar, generatörlerin belirli negatif dizilim akımlarına ve harmonik bileşenlere dayanma kapasitelerini tanımlar. Ayrıca, ekipman ömrünün korunması ve sistem güvenliğinin sağlanması açısından kritik bir rehber sunar.

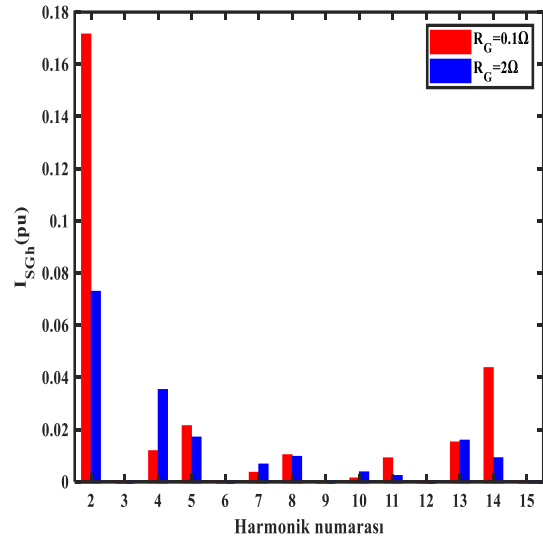
4.1 Stator Akımı Harmonik Bozulması

Farklı topraklama direnci değerleri için, V_{DA} 'nın 5 V/km olduğu durumda senkron generatörün stator sargılarındaki harmonik bileşenler Şekil 5'te sunulmuştur. Topraklama direnci $R_G=0.1 \Omega$ olduğunda, 2. ve 3. harmoniklerin oldukça yüksek genliklere ulaştığı görülmektedir. Öte yandan, $R_G=2 \Omega$ durumunda, harmonik genliklerinin genel olarak daha düşük olduğu, ancak pozitif sıra harmoniklerinin (örneğin, 4. ve 7. harmonikler) $R_G=0.1 \Omega$ durumuna kıyasla daha yüksek seviyelere ulaştığı gözlenmiştir. Bu durum, topraklama direncindeki artışın tüm harmonikleri bastırmadığını, bazı harmonik bileşenlerin genliğini artırabileceğini göstermektedir. Ayrıca, üçgen bağlı GYT alçak gerilim sargılarının sıfır sıra akımlarını engellemesine rağmen pozitif ve negatif sıra akımlarının stator sargılarında akmaya devam ettiği anlaşılmıştır. Bu akımların rotor yüzeyinde girdap akımları oluşturarak aşırı ısınmaya yol açabileceği ifade edilebilir.

Farklı ekipman türleri üzerindeki harmonik etkilerin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi genellikle, elde edilmesi zor olan ekipman verilerini gerektirir. Bu nedenle [27]'de, farklı ekipman türleri için mümkün olduğunca basitleştirilmiş ön tarama kriterleri sunulmuştur. Bu klavuzda belirtilen eşik değerlerini aşan harmonik seviyeleri, ilgili ekipmanın aşırı yük altında çalışacağını veya arızalanacağını kesin olarak göstermese de, bu durum ekipmanın daha detaylı bir şekilde incelenmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Bu bağlamda, [27]'de generatör stator akımındaki toplam harmonik bozulmaya (THD) dayalı olarak geliştirilen basitleştirilmiş termal ön tarama kriterleri Tablo 1'de sunulmuştur. Bu Tablo'daki eşik değerlerin aşılması durumunda rotor bileşenlerinde hasar riskinin artabileceği belirtilmiştir. Bu durumda, generatörün daha ayrıntılı bir analize tabi tutulması gerektiği vurgulanmaktadır.

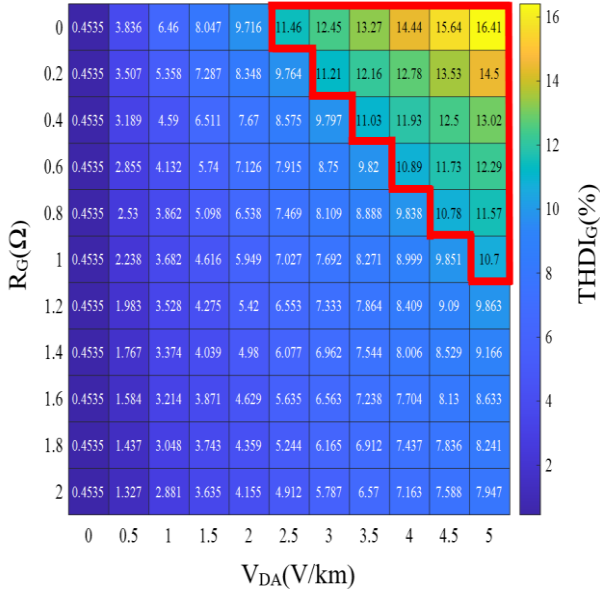
Topraklama direnci (R_G) ve jeomanyetik bozulmalar nedeniyle iletim hattı üzerinde indüklenen gerilim (V_{DA}) değişimine bağlı olarak senkron generatör stator akımının toplam harmonik bozulma (THD_I) değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. Kırmızı çizgilerle işaretlenen bölgeler, THD_I değerinin %10.7 sınırını aştığı noktaları göstermektedir. Başka bir ifadeyle, düşük R_G ve yüksek V_{DA} kombinasyonlarının, generatör stator akımında harmonik bozulmayı artırarak rotorun aşırı ısınmasına, sargı izolasyonlarının bozulmasına ve diğer bileşenlerde potansiyel hasara yol açabileceği ifade edilebilir.



Şekil 5: Senkron generatörün JİA koşulları altında ($V_{DA}=5$ V/km), $R_G=0.1$ ve 2Ω için stator akımlarının harmonik bileşenleri.

Tablo 1: Senkron generatörler için basitleştirilmiş ön tarama kriterleri [27].

Generatör Gücü	Stator akımının THD'si eşik değeri
< 350 MVA	> 0.107 pu
350-1250 MVA	> 0.107-0.00447*(MVA-350)
> 1250 MVA	> 0.067pu



Şekil 6: Senkron generatör stator akımının toplam harmonik bozulma değerinin V_{DA} ve R_G 'ye bağlı değişimi.

4.2 Harmoniklerden Kaynaklanan Rotor Isınması

IEEE Std. C50.12-2005 ve C50.13-2014, senkron generatörlerin sürekli negatif dizi akımı (I_2) taşıma kapasitesini (limitlerini), makine tipi, gücü ve soğutma mekanizmasına bağlı olarak tanımlar. Bu bilgiler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Generatör tipine göre izin verilen I_2 (%) değerleri [28, 29].

Generatör Tipi	İzin verilen I_2 (%)
Çıkık kutuplu	
Amortisör sargıları bağlı	10
Amortisör sargıları bağlı	5
Silindirik rotorlu	
Dolaylı soğutmalı	10
Doğrudan soğutmalı	
• 350 MVA'ya kadar	8
• 351-1250 MVA	$8 - (MVA - 350)/300$
• 1251-1600 MVA	5
• 1600 MVA	Anlaşmaya göre

Generatörler genellikle dengesizliklere ve harmonik akımlara karşı negatif sıralı akım koruma röleleriyle korunur. Bu röleler, generatörün sıcaklığının belirlenen maksimum I^2t termal kapasite sınırlarının altında kalmasını sağlamak amacıyla, negatif sıralı akıma bağlı olarak zaman sınırlı bir şekilde çalışır. Böylece, olası termal

hasarlar önlenerek generatörün güvenli ve verimli bir şekilde çalışması sağlanır.

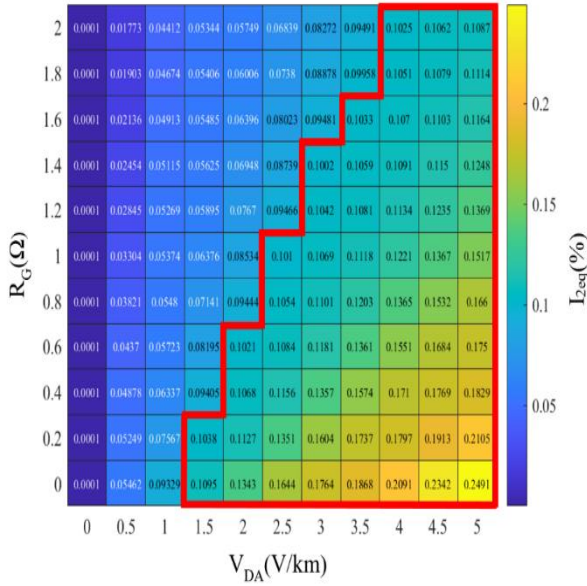
Bu standartlar, stator harmonik akımlarının rotor üzerindeki ısıtma etkilerini değerlendirmek için bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem, gerçek negatif sıra akımı ve tüm harmoniklerin oluşturduğu toplam ısınma etkisini, eşdeğer bir negatif sıra akımı ile ifade etmektedir. Bu standartlara göre, hesaplanan bu eşdeğer negatif sıra akımı, Tablo 2'de belirtilen izin verilen sınırı aşmamalıdır. Eğer eşdeğer akım, bu sınırın %25'ini geçerse, generatörün harmonik ısınmaya dayanıklılığını değerlendirmek veya tasarım aşamasında beklenen harmonikler konusunda üreticiye bilgi vermek gereklidir. Eşdeğer negatif sıra akımı (I_{2eq}), aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanabilir [28, 29].

$$I_{2eq} = \sqrt{I_2^2 + \sum_{n=1,2,3,\dots} \sqrt{\frac{n+1}{2}} I_n^2} \quad (5)$$

Burada, $i=+1$ pozitif sıra harmonik bileşenleri için, $i=-1$ negatif sıra harmonik bileşenleri için kabul edilir. I_n , n . harmonikteki stator akımı genliğini ifade eder. n , temel bileşen ($n=1$) dahil olmak üzere önemli akım değerine sahip tüm harmonik numaralarını kapsar. I_2 , negatif sıra temel akımını ifade eder.

Denklem (5), yalnızca tek sayılı harmonikler için i endeksini tanımlamakta ve harmoniklerin her zaman klasik bir sıraya göre dağıldığını varsaymaktadır (örneğin, 5. harmonik negatif sırada, 7. harmonik pozitif sıradadır). Ancak, jeomanyetik bozucu olaylar sırasında hem çift hem de tek sayılı harmonikler önemli miktarlarda ortaya çıkabilir [12, 13]. Bu nedenle, harmonik sıralarını dikkate almak yerine i indeksinin, sıra bileşenlerine dayalı olarak tanımlanması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu yeni tanımlama, formülün hem çift hem de tek sayılı harmonikleri kapsayacak şekilde geliştirilmesini sağlayacaktır [14, 27]. Bununla birlikte, standartlarda yer alan Denklem (5), I_2 'yi negatif sıra temel akımı olarak tanımlarken, bu geliştirme yapıldığında I_2 aynı zamanda ikinci harmonik stator akımlarını ifade edebilir ve bu durum karışıklığa yol açabilir. Bu potansiyel karışıklığı önlemek adına, Denklem (6) daha açıklayıcı ve geliştirilmiş bir şekilde aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir [27]:

$$I_{2eq} = \sqrt{\sum_{n=1,2,3...} \sqrt{\frac{n+1}{2}} I_n^2} \quad (6)$$



Şekil 7: Eşdeğer negatif sıra akımı değerinin V_{DA} ve R_G 'ye bağlı değişimi.

Şekil 7, topraklama direnci (R_G) ile jeomanyetik bozulmalar sebebiyle iletim hattı üzerinde indüklenen gerilim (V_{DA}) seviyelerinin eşdeğer negatif sıra akımı (I_{2eq}) üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde göstermektedir. Kırmızı çizgiyle işaretlenen bölge, çalışılan generatör için I_{2eq} 'nin limit değerinin aşıldığı alanları ifade etmektedir. Grafik, V_{DA} seviyesinin belirli bir eşik değeri aştığında ($V_{DA} \geq 4$ V/km), tüm topraklama direnci değerleri için I_{2eq} 'nin limit değerini aştığını ortaya koymaktadır. Jeomanyetik bozulmalar sırasında iletim hattında kilometre başına düşen DA gerilim düşümü seviyesi 16 V/km olarak düşünüldüğünde [18], generatörün orta JİA seviyelerinde termal kapasite sınırına ulaşabileceği ifade edilebilir. Özellikle, düşük topraklama direnci değerlerinde, V_{DA} seviyesi düşük olsa bile I_{2eq} 'nin hızla arttığı ve sınır değeri aştığı gözlemlenmektedir. Bu durum, düşük topraklama direncinin, JİA etkilerinin daha belirgin hale gelmesine ve eşdeğer negatif sıra akımının kritik seviyelere ulaşmasına neden olduğunu göstermektedir. Öte yandan, V_{DA} seviyesinin düşük olduğu durumlarda, topraklama

direncindeki artış, I_{2eq} 'yi düşürmektedir. Bu da, topraklama direncinin, jeomanyetik fırtınaların etkilerini sınırlamak için önemli bir parametre olduğunu vurgulamaktadır.

5. ZAMAN ETKİN TAHMİN MODELİ

Bu çalışmada, Matlab/Simulink ortamında oluşturulan test sisteminde gerçekleştirilen analizler yüksek doğrulukta sonuçlar sunmakla birlikte, karmaşık hesaplama süreçleri nedeniyle önemli ölçüde zaman alabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan sistemde her bir analiz yaklaşık 8 dakika sürmektedir. Bu süre, çok sayıda parametrik analiz üzerinde çalışıldığında toplam hesaplama süresini oldukça artırmaktadır. Simülasyonlar ve modelleme işlemleri, aşağıdaki teknik özelliklere sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir:

- İşlemci: 13th Gen Intel(R) Core(TM) i9-13900HX 2.20 GHz
- Bellek: 64 GB DDR4 RAM
- İşletim Sistemi: Windows 11 Pro
- MATLAB ve Simulink Sürümü: MATLAB R2024a

Bu problemi çözmek ve süreci hızlandırmak amacıyla Yanıt Yüzeyi Yöntemi (Response Surface Methodology, RSM) kullanılmıştır. Bu yöntemde, bağımsız değişkenler (faktörler) (X_1 ve X_2) ile bağımlı değişkenler (yanıtlar) (Y) arasındaki ilişkiler, matematiksel modellerle Denklem 7'deki gibi ifade edilebilir [35, 36]. Böylece, sistemin davranışı hızlı ve etkili bir şekilde öngörülebilir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (7)$$

Problemin çözümüne yönelik olarak, yanıt değişkenleri (I_{2eq} , $THDI_G$, Q_1) ile faktörler (V_{DA} , R_G) arasındaki matematiksel ilişkileri belirlemek amacıyla Minitab 18 istatistiksel yazılımı kullanılarak 3Y analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu ilişkilerin elde edilmesi için, hazırlanan deney tasarımı kapsamında, Tablo 3'te verilen V_{DA} ve R_G 'nin gerçek ve kodlanmış değerleri kullanılarak ilk deneyler yapılmıştır.

Tablo 3: 3Y analizi için hazırlanan deney tasarım tablosu.

Kodlanmış V_{DA}	Kodlanmış R_G	Gerçek V_{DA}	Gerçek R_G	Tahmin Edilen $I_{2eq}(pu)$	Tahmin Edilen $THDI_G(\%)$	Tahmin Edilen $Q_1(pu)$
-1	-1	0	0	0.009134	1.1326	0.020289
1	-1	5	0	0.249068	16.5963	0.481989
-1	1	0	2	0.000531	0.3605	0.017856
1	1	5	2	0.100064	7.3611	0.141556
-1	0	0	1	0.009366	0.1326	0.027944
1	0	5	1	0.160368	11.0996	0.264756
0	-1	2,5	0	0.155398	10.5946	0.253922
0	1	2,5	2	0.076594	5.5909	0.082489
0	0	2,5	1	0.101798	7.2136	0.121189

Yanıt yüzeyi yöntemi kapsamında, deneysel tasarım için tam ikinci derece (full quadratic) model kullanılmıştır. İlk deneylerin sonuçlarına göre, 3Y'ye dayalı matematiksel modeller %95 güvenilirlikle oluşturulmuştur ve aşağıdaki regresyon denklemlerinde (8)–(10) sırasıyla R^2 değeri %99.21, %98.98 ve %98.66 olarak bulunmuş olup, modellerin mevcut verilere uyumunun oldukça yüksek olduğu söylenebilir.

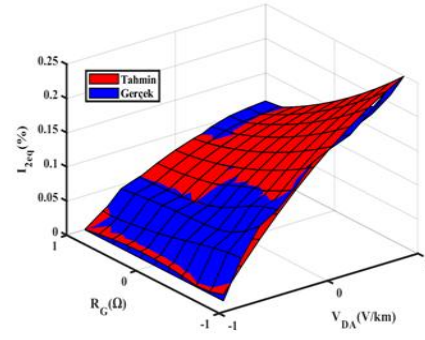
$$I_{2eq} = 0.0091 + 0.06902 * V_{DA} - 0.0327 * R_G - 0.00421 * V_{DA}^2 + 0.01420 * R_G^2 - 0.01404 * V_{DA} * R_G \quad (8)$$

$$THDI_G = 1.133 + 4.477 * V_{DA} - 2.14 * R_G - 0.277 * V_{DA}^2 + 0.879 * R_G^2 - 0.846 * V_{DA} * R_G \quad (9)$$

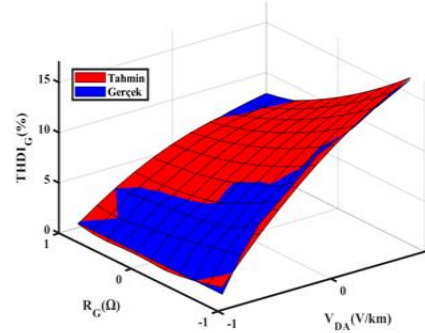
$$Q_1 = 0.0203 + 0.0946 * V_{DA} - 0.0952 * R_G - 0.00045 * V_{DA}^2 + 0.0470 * R_G^2 - 0.03380 * V_{DA} * R_G \quad (10)$$

Şekil 8, I_{2eq} , $THDI_G$ ve Q_1 'in gerçek değerleri ile 3Y tabanlı model tarafından tahmin edilen değerlerin karşılaştırılmasını sunmaktadır. Bu şekil, modelin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar ürettiğini ve tahminlerin güvenilir olduğunu açıkça göstermektedir.

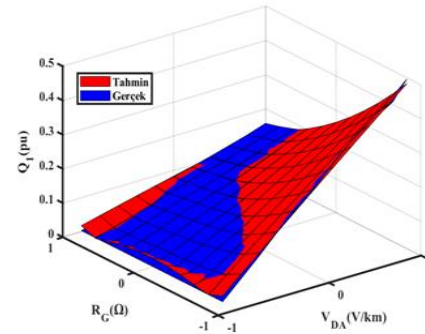
3Y tabanlı modelin performansını değerlendiren RMS hata (RMSE) değerleri, modelin doğruluğunu daha ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. I_{2eq} için %1.1, $THDI_G$ için %0.51 ve Q_1 için %1.44'lük RMSE değerleri, modelin oldukça yüksek bir tahmin doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Bu da modelin enerji sistemlerinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 8: (a) I_{2eq} , (b) $THDI_G$ ve (c) Q_1 için tahmin edilen değerler ile gerçek değerlerin karşılaştırılması.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, jeomanyetik olayların generatör yükseltme transformatörleri (GYT) ve senkron generatörler üzerindeki etkileri incelenmiş ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Jeomanyetik olarak indüklenen akımlar, GYT'lerde manyetik doyuma neden olarak mıknatıslanma akımlarını ve harmonik bozulmaları artırmaktadır.
- Düşük topraklama direnci, GYT ve generatör üzerinde jeomanyetik indüklenen akımların (JİA) olumsuz etkilerini artırmaktadır. Buna karşılık, daha yüksek topraklama dirençleri, harmonik bozulmaların ve reaktif güç taleplerinin azalmasına katkı sağlamaktadır.
- MATLAB/Simulink modeline dayalı analizler, orta seviyelerdeki JİA koşullarının dahi senkron generatörlerin termal kapasite sınırlarına ulaşabileceğini göstermiştir.
- Yanıt yüzeyi yöntemiyle geliştirilen matematiksel modeller, JİA etkilerinin hızlı ve etkin bir şekilde tahmin edilmesini sağlamış ve model doğruluğu yüksek bulunmuştur.

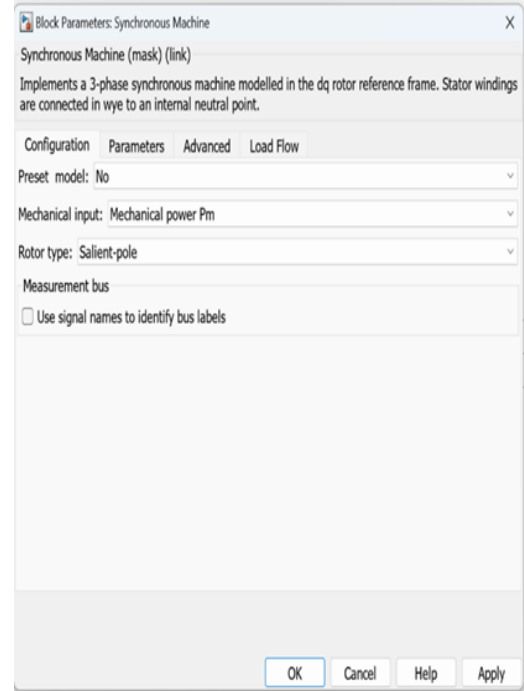
Yazarların gelecekteki çalışmalarında, generatörlerin reaktans üzerinden topraklanmasının JİA etkileri üzerindeki rolü kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır.

Yazar Katkıları: Her iki yazar, literatür taraması, araştırma fikrini geliştirme, makale yazımı ve düzenlemesi süreçlerine ortak katkı sağlamıştır.

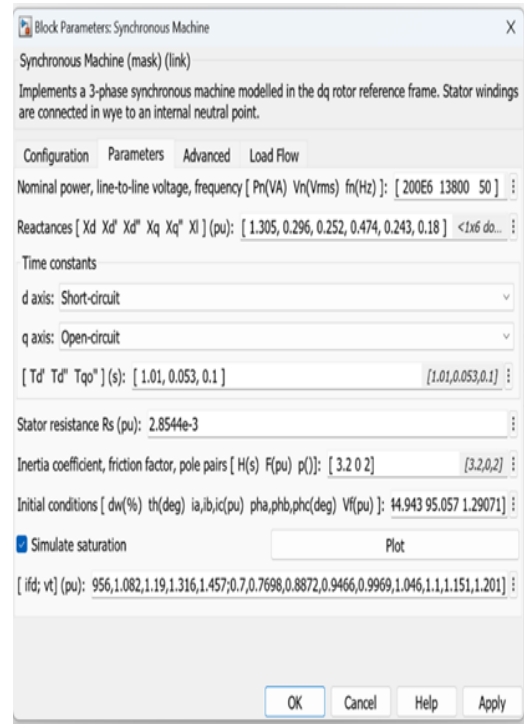
Teşekkür: Bu çalışma, Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenen 2024/045 numaralı proje kapsamında yürütülmüş olup, ilgili projenin bir çıktısıdır.

Çıkar Çatışması: Bu çalışmanın yazarları, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmiştir.

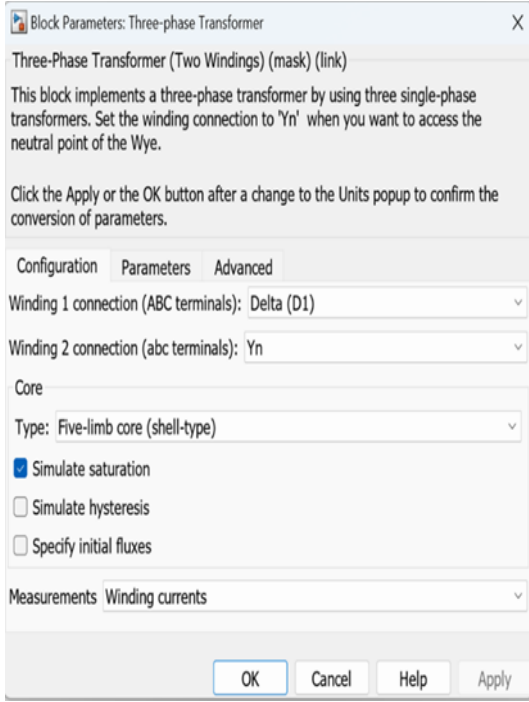
7. EKLER



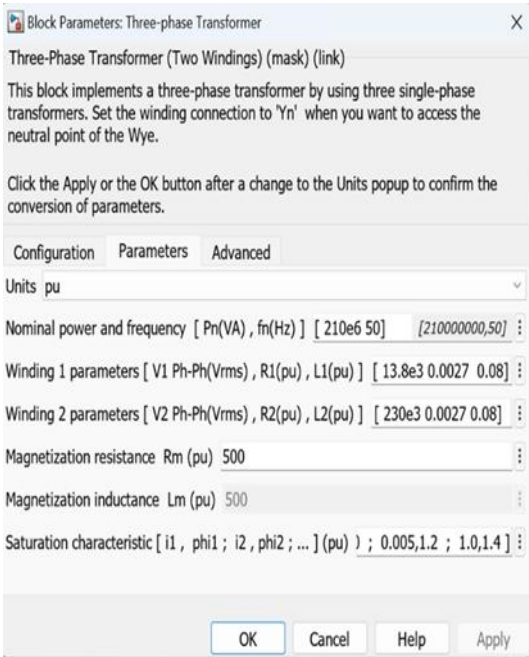
Şekil A.1: Senkron generatör ara yüzünün konfigürasyonu.



Şekil A.2: Senkron generatör ara yüzünün menüsü.



Şekil A.3: Transformatör ara yüzünün konfigürasyonu.



Şekil A.4: Transformatör ara yüzünün parametreler menüsü.

8. KAYNAKLAR

[1] S. Shetye and T. J. Overbye, "Modeling and analysis of GMD effects on power systems: An overview of the impact on large-scale power systems," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 13–21, 2015.

[2] F. R. Faxvog *et al.*, "Power grid protection against geomagnetic disturbances (GMD)," in *Proc. IEEE Electr. Power Energy Conf. (EPEC)*, Halifax, NS, Canada, 2013, pp. 1–13.

[3] P. R. Price, "Geomagnetically induced current effects on transformers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 4, pp. 1002–1008, 2002.

[4] R. Langella, A. Testa, and A. E. Emanuel, "On the effects of subsynchronous interharmonic voltages on power transformers: Three-phase units," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 2461–2471, 2008.

[5] A. Rezaei-Zare, L. Marti, A. Narang, and A. Yan, "Analysis of three-phase transformer response due to GIC using an advanced duality-based model," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, no. 5, pp. 2342–2350, 2016.

[6] M. Lahtinen and J. Elovaara, "GIC occurrences and GIC test for 400 kV system transformer," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 2, pp. 555–561, 2002.

[7] A. Rezaei-Zare, "Behavior of single-phase transformers under geomagnetically induced current conditions," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 2, pp. 916–925, 2014.

[8] S. Canturk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, and A. K. Koseoglu, "Investigation of the effects of DC bias on single-phase shell type transformers using frequency-dependent reluctance-based model," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, no. 9, pp. 1–10, 2021.

[9] S. Canturk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, and A. K. Koseoglu, "Performance analysis of three-phase five-leg transformers under DC bias using a new frequency-dependent reluctance-based model," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 16, no. 12, pp. 2455–2465, 2022.

[10] R. Girgis and K. Vedante, "Effects of GIC on power transformers and power systems," in *Proc. IEEE PES T&D Conf. Expo.*, Orlando, FL, USA, 2012.

[11] O. Samuelsson, "Geomagnetic disturbances and their impact on power systems," *Industrial Electrical Engineering and Automation Status Report*, Lund University, 2013.

[12] V. D. Albertson *et al.*, "Geomagnetic disturbance effects on power systems. Discussion," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 3, pp. 1206–1216, 1993.

[13] W. B. Gish, W. E. Feero, and G. D. Rockefeller, "Rotor heating effects from geomagnetic

- induced currents," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 2, pp. 712–719, 1994.
- [14] A. Rezaei-Zare and L. Marti, "Generator thermal stress during a geomagnetic disturbance," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 1–5.
- [15] P. Jankee, D. T. O. Oyedokun, and H. Chisepo, "Harmonic sequences affecting synchronous generator response to GIC," in *Proc. IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Kigali, Rwanda, 2022, pp. 1–5.
- [16] P. Jankee, D. T. O. Oyedokun, and H. K. Chisepo, "Dynamic response of power systems with real GICs: Impact on generator excitation control," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 37, no. 6, pp. 4911–4922, 2022.
- [17] P. Jankee, D. T. O. Oyedokun, and H. Chisepo, "Synchronous generator modelling and excitation voltage control for GIC studies," in *Proc. 13th IEEE PES APPEEC*, Thiruvananthapuram, India, 2021, pp. 1–6.
- [18] A. H. Etemadi and A. Rezaei-Zare, "Optimal placement of GIC blocking devices for geomagnetic disturbance mitigation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2753–2762, 2014.
- [19] K. Zheng *et al.*, "Effects of system characteristics on geomagnetically induced currents," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 2, pp. 890–898, 2014.
- [20] Z. M. K. Abda, N. F. Ab Aziz, M. Z. Ab Kadir, and Z. A. Rhazali, "A review of geomagnetically induced current effects on electrical power system: Principles and theory," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 200237–200258, 2020.
- [21] M. Kazerooni, H. Zhu, and T. J. Overbye, "Improved modeling of geomagnetically induced currents utilizing derivation techniques for substation grounding resistance," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 32, no. 5, pp. 2320–2328, 2017.
- [22] U. Bui, T. J. Overbye, K. Shetye, H. Zhu, and J. Weber, "Geomagnetically induced current sensitivity to assumed substation grounding resistance," in *Proc. North Amer. Power Symp. (NAPS)*, Manhattan, KS, USA, 2013, pp. 1–6.
- [23] *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System Part 1: Normal Measurements*, IEEE Std 81-1983, pp. 1–44, Mar. 11, 1983.
- [24] *IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems*, IEEE Std 81.2-1991, pp. 1–112, Jun. 25, 1992.
- [25] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Std 80-2013 (Rev. IEEE Std 80-2000/Incl. Corrigendum 1-2015), pp. 1–226, May 15, 2015.
- [26] A. L. Kinyon, "Earth resistivity measurements for grounding grids," *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng. Power Appar. Syst.*, vol. 80, no. 3, pp. 795–799, 1961.
- [27] Electric Power Research Institute (EPRI), "3002017707 – Assessment guide: Geomagnetic disturbance harmonic impacts and asset withstand capabilities," Tech. Update. [Online]. Available: <https://www.epri.com/research/products/000000003002017707>
- [28] *IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above*, IEEE Std C50.12-2005, pp. 1–45, Feb. 15, 2006.
- [29] *IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above*, IEEE Std C50.13-2014, pp. 1–63, May 9, 2014.
- [30] D. H. Boteler and R. J. Pirjola, "Modeling geomagnetically induced currents," *Space Weather*, vol. 15, no. 1, pp. 258–276, 2017.
- [31] D. H. Boteler, R. Pirjola, C. Blais, and A. Foss, "Development of a GIC simulator," in *Proc. IEEE PES Gen. Meeting Conf. Expo.*, National Harbor, MD, USA, 2014.
- [32] MathWorks, "Model the dynamics of three-phase round-rotor or salient-pole synchronous machine – Simulink," Nov. 2024. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/sps/power_sys/ref/synchronousmachinesifundamental.html
- [33] *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*, IEEE, vol. 2, Nov. 2002.
- [34] Typhoon HIL, "Typhoon HIL software manual." [Online]. Available: <https://www.typhoon->

hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/References/ieee_type1_exciter.html

- [35] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
- [36] A. Bonner, et al., "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 1, pp. 452–465, 1996.