

AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN SİNİZOIDAL OLMAYAN ŞARTLARDA PERFORMANSININ SİMULASYON İLE İNCELENMESİ

Seher YILDIZ¹

M. Hakan HOCAOĞLU²

^{1,2}Elektronik Mühendisliği Bölümü

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 41400, Gebze, Kocaeli

¹Arge Bölümü

ALCE Elektrik A.Ş., 34906, Pendik, İstanbul

¹e-posta: shryildiz@yahoo.com

²e-posta: hocaoglu@gyte.edu.tr

Anahtar sözcükler: Akım transformatörü, Doyma, Harmonikler, Güç Kalitesi, EMTP

Özet

Şebeke akımının harmonikli olması durumunda, koruma tipi akım transformatörlerinin (AT) çalışma aralığı önemli ölçüde değişebilmektedir. Transformatörlerin üretimi sırasında ulusal ve uluslararası standartlarda tanımlanan testlerle doğrulanan çalışma aralığı, koruma amaçlı rölelerin gerektiği gibi çalışabilmeleri açısından önemli bir parametredir.

Bu bildiriye, akım transformatörünün performansı; histeresis olgusu ihmal edilip saturasyon etkisi dikkate alınarak EMTP'nin ATP versiyonunda simülasyon ile incelenmiştir. Modelin hassasiyeti, sinüzoidal uyarımda yapılan laboratuvar testleri ile doğrulanmış ve sonrasında sinüzoidal olmayan şartlarda parametrik analiz yapılmıştır. Söz konusu parametreler, koruma tipi AT'nin performansını etkileyen DC bileşen ve alt harmonikler olarak belirlenmiştir.

1. Giriş

Akım transformatörleri; elektrik sistemlerinde büyük akım değerlerini, ölçülebilir akım değerlerine (5A-1A) getirerek çeşitli ölçü aletlerini ve röleleri ana elektrik sisteminden izole etmeyi sağlayan ekipmanlardır. Akım trafoları genel olarak iki farklı amaç için üretilirler; bunlar ölçme ve koruma olarak sıralanabilir [1]. Ölçü trafoları; sadece sistem akımını ölçme amacı taşıdığı ve kendisine bağlı ölçü aletlerinin zarar görmemesi gerektiği için sınırlı bir bölgede çalışmaktadırlar. Koruma trafoları ise sistemde oluşabilecek kısa devre ve aşırı akımları belirli bir oranda rölelere iletmek durumunda oldukları için çok daha geniş bir bölgede çalışmakta olup hayati önem taşımaktadır. Kısa devre akımları, anahtarlama, aşırı akımlar, nonlineer yükler vs. sinüzoidal olmayan şartları da beraberinde getirebileceği için koruma akım trafolarının bu şartlardaki performansı önem kazanmaktadır.

Bu nedenle bu bildiriye sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda IEC standardına [1] uygun koruma (protective) akım trafolarının kararlı haldeki (steady state) performansı incelenmektedir.

Söz konusu şartları oluşturarak deneysel inceleme yapmak mümkün olmasına rağmen zahmetli ve maliyetli olması sebebiyle simülasyon ile inceleme tercih edilmiştir. Bunun için ATP-EMTP (Alternative

Transient Program-Electromagnetic Transient Program) [2], ATPdraw [3] arayüzü kullanılarak güvenilir bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur. Tüm simülasyonlar ATP ile gerçekleştirilerek sinüzoidal şartlar için modellerin geçerliliği teyit edilmiştir. ATP'de "saturable one phase" trafo modu kullanılması sebebiyle magnetik malzemenin histeresis eğrisi ihmal edilip saturasyon eğrisi ile çalışılmıştır.

2. İncelenen Akım Transformatörü

Bu bölümde simülasyonda kullanılan ve özellikleri Tablo 1 de sunulan trafoya göre, koruma akım trafolarının genel özelliklerine değinilmektedir [1].

Tablo 1 Akım trafosunu tanımlayan temel parametreler (etiket değerleri)

Etiket değerleri	300/5A 5P 5 5VA $I_{eth}=1 \times I_n$ $I_{th}=25kA1s$
Çevirme oranı	300/5A
Hassasiyet sınıfı (Accuracy class)	5P
Hassasiyet sınır aşırı akım faktörü "n" (Accuracy limiting factor)	5
Sekonder yükü (Burden)	5VA
Sürekli termik akımı (Continuous thermal current)	$I_{eth} = 1 \times I_n (=300A)$
Kısa devre akımı (short circuit current)	$I_{th}=25kA (1sn)$

Tablo 1 yer alan: Hassasiyet sınıfı; primer akımının sekonder akımına indirgenmesi sırasında oluşabilecek hata miktarını, n faktörü; trafonun nominal primer akımının kaç katına kadar hassasiyet sınıfının içinde olacağını, sekonder yük (burden); alçak akım tarafına bağlanacak cihazların (rölelerin) azami gücünü, I_{eth} ; termal olarak sürekli çalışabileceği akımı, I_n ; termal olarak kısa süre ile dayanabileceği akımı belirtmektedir. Koruma amaçlı akım trafolarında hassasiyet sınıfları ve bunlara ilişkin hata miktarları Tablo 2'de sunulmuştur. Tablodan da görüleceği üzere ölçü akım trafolarından farklı olarak koruma akım trafolarında hata ölçümü nominal akım ve nominal yükte yapılmaktadır [1].

Tablo 2 Koruma akım trafolarının hata limitleri

Hassasiyet sınıfı	Nominal primer akımındaki akım hatası %	Nominal primer akımındaki faz hatası [dk.]		Nominal hassasiyet sınır akımındaki bileşik hata %
		Dakika	Santiradyan	
5P	±1	±60	±1.8	5
10P	±3	-	-	10

Trafo primer akımını sekonder akımına dönüştürürken oluşabilecek üç tip hata vardır [4]:

-Akım hatası (%AH); efektif dönüştürme oranı hatasıdır,

$$\% AH = \frac{(K_n \cdot I_s - I_p) \cdot 100}{I_p} \quad (1)$$

(1)'de K_n , nominal dönüştürme oranıdır (300/5A=60). I_p , primerden geçen gerçek akım (300/5A dizayn edildiği dönüştürme oranını belirtmektedir oysa trafonun primerinden geçen akım değeri bağlı olduğu işletmenin/cihazın, yük durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterir). I_s , primerden I_p akımı geçerken sekonderden ölçülen akım.

-Faz hatası (FH), ölçümdeki reaktif kayıplar nedeniyle oluşan faz farkı hatasıdır, birimi [dakika] veya [santiradyan]'dır.

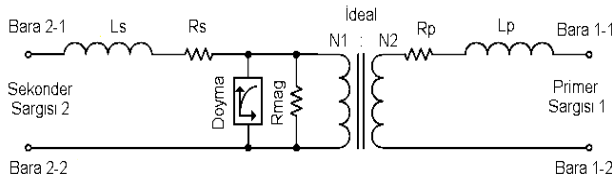
-Bileşik hata (% ϵ_b); sistem akımının sinüzoidal olmadığı şartlardaki hata akımını belirleyebilmede, sekonder ve primer akımlarının anlık değerleri dikkate alınarak (2) de verildiği gibi hesaplanır.

$$\epsilon_b = \frac{100}{I_p} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n \cdot i_s - i_p)^2 dt} \quad (2)$$

Burada; i_p , anlık primer akımını, i_s , anlık sekonder akımını temsil etmektedir. Akım hatası efektif değerler dikkate alınarak hesaplandığından nonsinüzoidal şartları yeterince yansıtamamaktadır. Buna karşın faz hatası ve bileşik hata anlık olarak incelendiği için hem sinüzoidal hem de nonsinüzoidal şartları (akımın dalga şeklindeki değişiklikleri) yansıtabilmektedir.

3. Akım Transformörü Modeli

Akım trafosunu modelleyebilmek için öncelikle çalışma mantığı, şekil 1'deki gibi elektrik devresi olarak çizilmiştir. Akım trafosunda magnetik devre ve üzerine sarılan teller sekonderi oluşturduğundan, devrede nüve sekonder tarafta yer almaktadır.



Şekil 1- Akım trafosu modeli [2]

R_{mag} ; magnetik devrenin direncini, L_s ; sekonder bobinin endüktansını, R_s ; sekonder bobinin direncini ifade etmektedir. Primer devredeki iletkenin kesiti çok

büyük ve bara geçişli olduğundan R_p ve L_p ihmal edilebilir [5].

Akım transformörünün sınıfını belirlemede nüve, çok etkin bir görev üstlenmekte olduğundan özelliğinin mümkün olduğunca gerçeğe yakın olarak modele aktarılması gerekmektedir. Nüvenin akım transformörleri açısından 4 farklı bölgede çalıştığı söylenebilir; lineer bölgenin başlangıcı olan bilek noktası (ankle point), bilek noktasından diz noktasına kadarki lineer bölge (ankle point - knee point), diz bölgesi (knee region) ve doyum bölgesi (saturation) [6]. Genellikle koruma akım trafoları, bilek noktası ile diz bölgesi arasında çalışmaktadır. Buna rağmen simülasyonlarda nonsinüzoidal şartlar inceleneceğinden doyma bölgesi de dikkate alınmaktadır. Saturasyon bölgesinde; H artmasına rağmen B artmadığından, primer akımın artış oranında sekonderde gerilim endüklenemez ve trafo sınıfının dışına çıkar. Bu durum; akım trafosunun hatalarının hangi parametrelere bağlı olduğunu belirlemek için trafo modelinden [7] elde edilen (3) ve bilinen (4) bağıntısı yardımıyla çıkartılan (5) denkleminde açıkça görülmektedir.

$$F = \frac{\sqrt{2} \cdot E \cdot 10^8 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot q_E \cdot w \cdot \mu_g \cdot a_1} \quad (3)$$

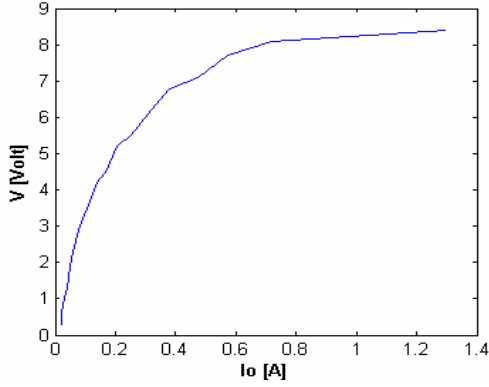
$$E = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot B \cdot q_E \cdot w \cdot 10^{-8} \quad (4)$$

$$F = \frac{B \cdot 10^{-8}}{\sqrt{2} \cdot a_1 \cdot \mu_g} \quad (5)$$

E ; sekonderde endüklenen gerilimi [V], F ; vektörel olarak hata akımını [%], B ; magnetik akı yoğunluğunu [Tesla], f ; frekansı [Hz], q_E ; nüve kesiti [cm^2], w ; sekonder siper sayısını, μ_g ; nüvenin geçirgenliğini, $a_1 = A_{eff} / cm = f(B)$ 'yi ifade etmektedir.

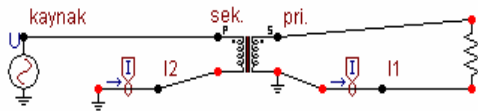
ATPdraw'un "saturable one phase" trafo moduna, sekonderin V-I eğrisine ait azami dokuz nokta girilerek magnetik devre tanımlanabilmektedir [2, 8]. Doğru modeli oluşturabilmek için koruma akım trafosunun çalıştığı bölge dikkate alınarak uyarım eğrisini en iyi ifade eden noktaların belirlenmesi gerekmektedir.

Nüvenin nonlinear özelliğini gösteren B-H eğrisi, şekil 2'deki gibi ölçüm sonucu elde edilen volt-akım eğrisi ile karakterize edilmiştir [6,9].



Şekil 2- 300 amper-sarımına göre dizayn edilen sekonder sargının mıknatıslanma eğrisi

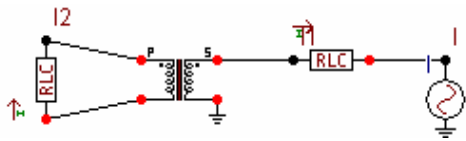
Bununla birlikte EMTP, simülasyonda akı-akım verisini kullandığından, V-I datusını kendi içinde akı-akım datusına dönüştürür [2]. Bu sırada mıknatıslanma eğrisinde hata olma olasılığına karşı, trafo modunun doğru çalıştığının tespit edilmesi gerekmektedir (şekil 3) [8]. Bu işlem sekonder sargının mıknatıslanma eğrisine göre çalışıp çalışmadığının testi gibi düşünebilir.



Şekil 3- Akım trafosunun test devresi

Bunun için sekonder taraftaki gerilim kaynağına, mıknatıslanma eğrisine ait bir gerilim değeri girilir ve bu gerilim değerine karşılık gelen akım değeri ile devrenin çalıştırılması sonucu elde edilen sekonder akım değeri karşılaştırılır. Aynı işlem, uyartım eğrisine ait bütün gerilim değerleri için yapıldığında; azami hata 0.002 mertebesinde ki bu hatada, uyartım eğrisindeki V-I değerlerinin yuvarlanmış olmasının etkisi de bulunmaktadır.

Test gerçekleştirildikten sonra akım trafosunun akım, faz ve bileşik hatası dolayısıyla da hassasiyetinin tespit edilebileceği, simülasyonda kullanılacak olan model oluşturulur (şekil 4) ve güvenilirliği araştırılır.



Şekil 4- Akım trafosu modeli

Şekil 4'teki devrede; I_2 akımının geçtiği kısım sekonder olup buradaki RLC, sekondere bağlanan ekipmanların, bağlantı araçlarının (röleler, kablolar vs.) yük değerini devreye girebilmeyi sağlar. Tablo 1'deki akım trafosunun sekonder yükü 5VA olduğu ve [1]'e göre 5VA ve üzerindeki yüklerde $\cos\phi$ değeri 0.8 kabul edildiği için cihazların R ve L değerleri, $R_y=0.16\Omega$ ve $L_y=0.382mH$ olarak hesaplanır. Hata ölçümü sırasında kullanılan kablunun direnci ise $R_k=0.03\Omega$ 'dur. Akım kaynağının bağlı olduğu kısım primerdir ve buradaki RLC, primere ait direnç ve endüktans ayrıca bağlantılara ait R parametreleri girmeyi sağlar. İncelenen akım

trafosunun primerine ait R ve L parametrelerinin simülasyonda etkisinin olmadığı teyit edildiği için ihmal edilmiştir.

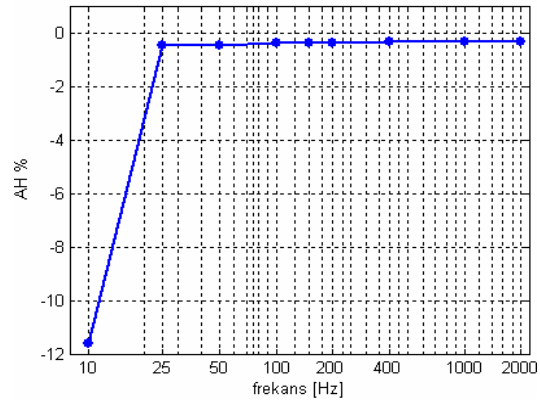
Program çalıştırıldığında elde edilen veriler ile deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında % 0.076'luk akım ve +2.4 dk'lık açı hatası ile ölçülen değerlere yakın sonuç elde edilebildiği görülmektedir. Bu işlemler farklı özelliklerdeki akım trafolarıyla da yapıldığında sonuçlar, ölçülen değerlere oldukça yakın çıkmaktadır. Bu nedenle EMTP aracılığıyla oluşturulan akım trafosu modelinin güvenilir olduğu kabul edilebilir [10].

4. Kaynak Dalga Şeklinin Akım Trafosunun Sınıfına Etkisi

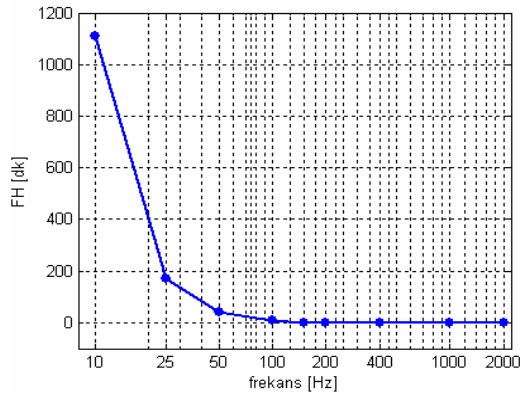
Normal çalışma koşullarında gerilim ya da akım trafoları sinüzoidal kaynağa bağlanırlar, buna rağmen sistemde nonlineer yükler, anahtarlama olması durumunda temel dalganın (akım, gerilim) sinüzoidal formu bozulur. Bu bozulma Harmonik teorisi kullanılarak incelenebilir. Harmonikli haldeki akım ve gerilimlerin cihazlara etkisi olacağı beklenmektedir [11]. Bu bölümde öncelikle primer akımının sinüzoidal olduğu durumda akım trafosunun hata değişimi, daha sonra da nonsinüzoidal olduğu durumun etkisi incelenecektir. Böylece iki farklı koşulda elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılacaktır.

4.1. Sinüzoidal Şartlar

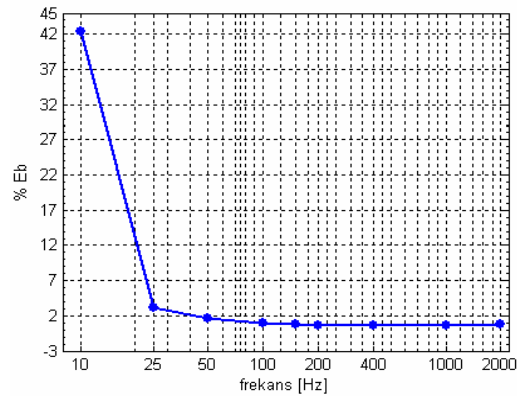
Sinüzoidal kaynağın nominal akımı sabit iken frekansa bağlı olarak akım trafosunun hata değişimi araştırıldığında şekil 5, 6 ve 7'deki grafikler elde edilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde; 50Hz'in altındaki frekanslarda [12] akım açısı ve bileşik hata giderek artmakta, 50Hz'in üzerindeki frekanslarda ise giderek azalmakta olduğu sonucu çıkmaktadır.



Şekil 5- Frekansa bağlı akım hatası değişimi



Şekil 6 Frekansa bağlı açı hatası değişimi

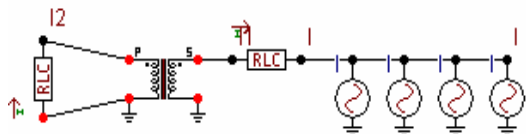


Şekil 7 Frekansa bağlı bileşik hata değişimi

Şekil 5, 6, 7'deki frekansa bağlı hata değişimi, (3) bağıntısındaki hata ile frekansın ters orantılı olmasını açıklamaktadır. Ancak bu ters orantı lineer değildir; 2000Hz'den itibaren hatanın frekansa bağlı değişiminin neredeyse sıfır düzeyine inmesi ve 25Hz ile 10Hz arasında hatanın büyük ölçüde artması (% -0.469'dan % -11.6'ya düşmesi) ise (3) bağıntısındaki hata-frekans arasındaki ters orantının nonlineerliğini ispatlamaktadır. Ayrıca belirli bir frekans (limit frekans değeri) [9] değerinden sonra (3) denklemi geçerliliğini yitirecektir. Nitekim frekans 1000 Hz'e kadar artırıldığında bileşik hata azalmakta, frekans 1000Hz'in üzerinde arttırılmaya devam edildiğinde ise bileşik hata çok belirgin olmasa da artışa (% -0.6412'dan % -0.7475'e) geçmektedir.

4.2. Nonsinüzoidal Şartların Etkisi

Nonsinüzoidal dalgalar, zaman eksenine göre periyodik-simetrik veya periyodik-asimetrik olabileceği için bu iki tipteki dalga formlarının etkisi, ayrı ayrı şekil 8'deki simülasyon devresi aracılığıyla incelenmiştir. Bununla birlikte şebekede periyodik olmayan ve asimetrik dalgalar da söz konusudur; bu tip dalgalar genellikle anahtarlama, devreye yük girip çıkması ve kısa devre anlarında oluşurlar. Bu durumla ilgili araştırma bu bildiriye yer almamaktadır.



Şekil 8- Harmonikli şartlar için akım trafosu modeli

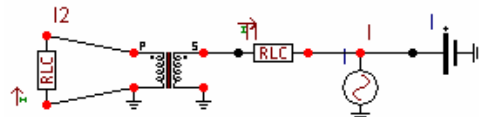
Periyodik ve simetrik (başka bir deyişle ortalama değeri sıfır olan) dalgalar, sistemde tek sayılı harmonikler mevcutken söz konusu olmaktadır [13]. Bunun için temel kaynağın nominal akımı 300A(rms), frekansı 50Hz iken, sistemde daha çok rastlanabilecek 3, 5, 7 gibi tek sayılı harmonikleri dikkate alarak ve harmonik akımlarını da I_{temel}/I_h şeklinde belirleyerek (THD % 41) analizler yapılmıştır (tablo 3).

Periyodik ve simetrik olmayan dalgalar ise, sistemde çift sayılı harmonikler mevcut olduğu durumda görülür. Ortalama değeri sıfırdan farklıysa DC bileşen ortaya çıkar. Bunun için de, yine temel kaynağın nominal akımı 300A(rms), frekansı 50Hz iken, sistemde daha çok rastlanabilecek 2, 4, 6 gibi çift sayılı harmonikleri dikkate alarak ve harmonik akımlarını da I_{temel}/I_h şeklinde [13] belirleyerek (THD % 58) analizler yapılmış olup tablo 3'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3- Akım dalgaseklinin hataya etkisi

Kaynak	% THD	% I_{dc}/I_n	% AH	FH [dk]	% ϵ_b
Temel kaynak	0	0	-	32.4	1.65
Temel harmonik ve tek harmonikler ($\varphi=0$)	41	0	-	4.32	1.55
Temel harmonik ve çift harmonikler ($\varphi=0$)	58	0	-	5.16	1.49

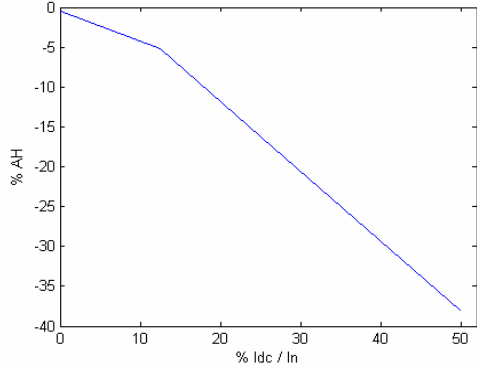
DC bileşen içermeyen 50Hz'in üzerindeki tek ve çift harmoniklerin, trafonun kararlı haldeki akım ve bileşik hataya az da olsa olumlu etkisinin olduğu, açı hatasına ise +32.4dk.'dan 5dk. seviyesine düşüş olduğu için önemli ölçüde olumlu etkisinin olduğu görülmektedir. Periyodik, asimetrik ve ortalama değeri sıfırdan farklı olan kısaca DC bileşen içeren dalgaların etkisi, şekil 9'daki model aracılığıyla incelenmiştir.



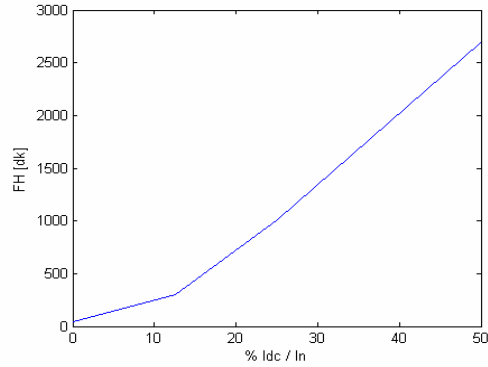
Şekil 9- Temel kaynağa DC bileşen eklenmesi

Simülasyonda DC bileşen; temel kaynağa ek olarak doğru akım kaynağı ilavesi ile elde edilmiştir ve sonuçlar şekil 10, 11, 12'de gösterilmektedir.

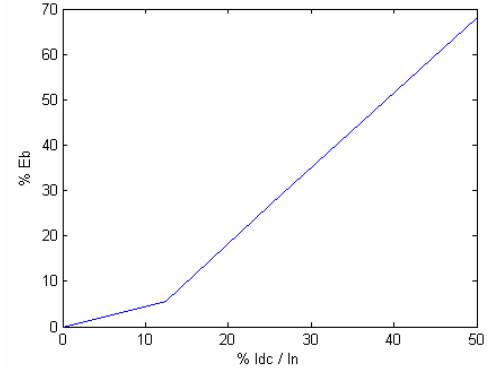
Kısa devre anında DC bileşen miktarı, [14] gereğince ilk periyottaki genlik olarak kısa devre akımının tepe değerinin 2 katına çıkabileceği için I_{dc}/I_n oranı %50'ye kadar inceleme yapılmıştır.



Şekil 10- DC bileşen oranına bağlı akım hatası



Şekil 11- DC bileşen oranına bağlı açılı hatası



Şekil 12- DC bileşen oranına bağlı bileşik hata

I_{dc}/I_n oranının yaklaşık %2'ye ulaşmasıyla akım trafosu hata sınırlarının dışında çalışmaya başlamaktadır. Bu oran yaklaşık %12'nin üzerine çıkması ile bütün hata miktarlarındaki artış hızlanmaktadır. Bunun sebebi akım trafosu nüvesi %2' ye kadar bilek noktası ile diz noktası arasında çalışmakta, %12'den sonra ise doyum bölgesinde çalıştığı anlaşılmaktadır. Nüvenin çalışma noktası doyum bölgesine girdiğinde; mıknatıslanma akımı artar. Buna karşın endüklenen gerilimin artış oranı azalır. Bunun sonucu olarak da açılı ve bileşik hatası ise artı yönde, akım hatası eksi yönde artmaktadır.

Bu arada belirtilmesinde fayda var ki; bildiride verilen rakamsal sonuçlar incelenen trafoya ait olduğu için, trafoya ilişkin etiket bilgileri, kullanılan nüve cinsi değiştiğinde sonuçların doğrultusu aynı

kalmakla birlikte rakamsal sonuçlarda değişiklik olacaktır.

5. SONUÇ

Akım trafosunun teorik olarak beklenen çalışma karakteristiği ile ATP-EMTP programında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarının örtüşmekte olduğu tespit edilmiştir. DC bileşen içeren dalga formunun, akım trafosunun sınıfını olumsuz yönde etkileyen parametre olduğu anlaşılmıştır.

Trafonun bağlı olduğu sistemde; doğrultucu devreler, inverterler gibi güç elektroniği ekipmanları, ark fırınları gibi nonlineer yüklerin bulunması durumunda ya da kısa devre anında; primer akımındaki DC bileşen oranına göre, akım trafosunun çalışma bölgesi hassasiyet sınıfının dışına çıkabilir. Buna bağlı olarak rölelere iletilen bilgi sağlıklı olmayabilir.

Bu çalışma; kısa devre anı gibi geçici rejimlerdeki dalga formlarının, EMTP-ATP'de oluşturulup akım trafosunun primerine uygulanması ile daha da geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] IEC 60044-1, Current Transformers, Edition 1.2, 2003.
- [2] CAN/AM EMTP USER GROUP: Alternative Transients Program (ATP) Rule Book: IV.E. Saturable Transformer Component', CANADIAN/AMERICAN EMTP USER GROUP, 1992
- [3] L. Prikler, H. K. Høidalen, User's Manual, ATPDRAW for Windows Version 3.5, 2002
- [4] IEEE Std. C37.110, IEEE Guide for the Application of Current Transformers, 1996.
- [5] Working Group C-5 of the Systems Protection Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee, Mathematical Models for Current, Voltage and Coupling Capacitor Voltage Transformers, IEEE TRANS. ON POWER DELIVERY, Vol 15, No 1, pp. 62-72, 2000.
- [6] Mira P., Instrument Transformers, KAPPA ELECTRICALS, 2nd Edition, 2000.
- [7] R. Bauer, Die Messwandler Grundlagen, Anwendung und Prüfung, Springer – Verlag OHG., pp. 6-11, 1953
- [8] Ralph F., Determine Current Transformer Suitability Using EMTP Models, SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, Inc. Pullman, WA USA.
- [9] R. Boll, Soft Magnetic Materials, VACUUMSCHALMELZE HANDBOOK, pp 33, 309-310, 1979.
- [10] M. Kezunović, C. W. Fromen, F. Philips, Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study, IEEE TRANS. ON POWER DELIVERY, Vol. 9, No 1, pp 405-413, 1994.
- [11] E. Acha, M. Madrigal, Power System Harmonics Computer Modelling and Analysis, JOHN WILEY & SONS, 2001.
- [12] V. L. Pham, K. P. Wong, N. Watson, J. Arrilaga, Sub-Harmonic State Estimation In Power Systems, IEEE 0-7803-5935-6, pp. 1168-1173, 2000.
- [13] C. Kocatepe ve Ark., Elektrik Tesislerinde Harmonikler, BIRSEN YAYINEVI, 2003.
- [14] E. Clarke, Circuit Analysis of A-C Power Systems, Volume I and II, (J. Wiley and Sons, London, 1950).