

FARKLI BAĞLANTILARDAKİ ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRLERDE, HARMONİKLERİN BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU İLE HESAPLANMASI

M ZİLE^{1*}

1 Mersin Üniversitesi, Çiftlikköy Kampüsü, Mersin, TÜRKİYE,

Özet: Üç faz transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinde harmonik analizi yapılmıştır ve farklı bağlantı şekillerinin üç faz modelleri elde edilmiştir. Modelleri geçerli kılmak için kısa devre ve boşa çalışma deneyleri, duyarlılık ve alan testleri yapılmıştır. Geliştirilen algoritmalarla bu modelleri kullanarak ve Microsoft Visual C++ dilinin gelişmiş özellikleri kullanılarak, güç sistemlerinde harmonik analizi yapan bilgisayar simülasyonu oluşturulmuştur. Gerekli algoritmalar kullanılarak geliştirilen bu bilgisayar simülasyonu ile üç faz transformatör gruplarının manyetik doyma ile birlikte harmonik analizi yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarının çok başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Üç Faz Transformatör, Harmonikler, Doyma.*

CALCULATION HARMONICS BY COMPUTER SIMULATION IN THREE PHASE TRANSFORMERS WITH VARIOUS CONNECTION

Abstract: The harmonic analysis of inrush currents is useful for protective relay design. This study outlines an improved lecture or experiment that quantitatively analyses the wave forms of various transformer connectings under steady-state no-load conditions while taking into account the nonideal voltage supply. The experimental data obtained with the aid of a harmonic analyser are then compared to the quantitative predictions and the discrepancies are discussed. New iterative procedures using fourier transform algorithms are proposed for the harmonic studies of three-phase transformer banks with various connections under steady-state operating conditions produce different harmonic distortions, which are deliberately analysed and compared in this study. Good convergence is achieved for each iterative procedure of the corresponding transformer connection and the resulting current waveform and its spectrum are presented. An application program is advanced using Microsoft Visual C++ for harmonic analyses in this study. Simulation results proves the program's accuracy.

Keywords: *Three-Phase Transformer, Harmonics, Saturation.*

* Sorumlu yazar

mehmetzile@yahoo.com.tr

Giriş

Üç faz transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinde harmonik analizi yapılmıştır ve farklı bağlantı şekillerinin üç faz modelleri elde edilmiştir. Modelleri geçerli kılmak için kısa devre ve boşa çalışma deneyleri, duyarlılık ve alan testleri yapılmıştır. Geliştirilen algoritmalarla bu modelleri kullanarak ve Microsoft Visual C++ dilinin gelişmiş özellikleri kullanılarak, güç sistemlerinde harmonik analizi yapan bilgisayar simülasyonu oluşturulmuştur. Gerekli algoritmalar kullanılarak geliştirilen bu bilgisayar simülasyonu ile üç faz transformatör gruplarının manyetik doyma ile birlikte harmonik analizi yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarının çok başarılı olduğu görülmüştür. [1-2-3]

Harmonik Hesaplama

T periyotlu sürekli zaman periyodik sinyalleri, fourier serisi olarak ifade edildiğinde,

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega t} \quad (1)$$

$$= a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} 2A_k \cos(k\omega t + \theta_k) \quad (2)$$

$$= a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (c_k \cos k\omega t + d_k \sin k\omega t) \quad (3)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

$$a_k = A_k e^{j\theta_k} = \frac{1}{T} \int_T f(t) \cdot e^{-jk\omega t} dt \quad (5)$$

Üç simetrik özellik bulunur.

- Tek simetri: $f(-t) = -f(t)$, kosinüs terimi bulunmaz.

- Çift simetri: $f(-t) = f(t)$, sinüs terimi bulunmaz.

- Yarım dalga simetri: $f(t+T/2) = -f(t)$, çift harmonikleri bulunmaz.

Çizelge 1' de faz sırası ve harmonik derecesi arasındaki ilişki verilmiştir.

Çizelge 1 Her bir harmoniğin faz sırası

Faz sırası	+	-	0
	1	2	3
Harmonik derecesi	4	5	6
	7	8	9
	10	11	12
	.	.	.

Eğer üç faz transformatör grupları topraklanmazsa, hata kısmının sıfır sıralı harmonikleri mevcut olmaz. Harmonik dereceleri $6n \pm 1$ olacak şekilde sınırlanır ve 5, 7, 11, 13,..dir. $f(t)$ 'nin periyodunun T olduğunu varsayalım. Üç fazlı akımların toplamı sıfır olduğunda,

$$f(t) + f(t + \frac{T}{3}) + f(t + \frac{2T}{3}) = 0 \quad (6)$$

Yarım dalga simetrik özelliğinden,

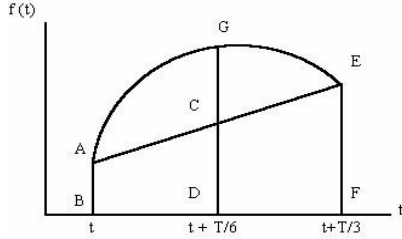
$$f(t + \frac{2T}{3}) = -f(t + \frac{T}{3}) \quad (7)$$

Eşitlik 7.7 eşitlik 7.6'da yer değiştirilip, tekrar düzenlendiğinde, aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

$$f(t) + f(t + \frac{T}{3}) = f(t + \frac{T}{6}) \quad (8)$$

Eşitlik 11' in değeri şekil 2' de gösterilmiştir.

AEFB yamuk şeklinde ve $\overline{BD} = \overline{DF}, \overline{AC} = \overline{CE}$ dir. Dikkatle incelendiğinde, \overline{CD} AEFB yamuğunun merkezidir. Bu yüzden $\overline{CD} = (\overline{AB} + \overline{EF})/2$ dir. Eşitlik 8 den, $\overline{AB} + \overline{EF} = \overline{DG}$ dir. Böylece $\overline{DG} = 2.\overline{CD}, \overline{CD} = \overline{CG}$ olur.



Şekil 1 Sıfır üçlü harmoniklerin dalga şekli

$f(t+T/3)$ yi \overline{AC} yi çizerek ve E noktasını seçerek $f(t)$ ve $f(t+T/6)$ 'dan hesaplanır. Böylece, $\overline{AC} = \overline{CE}$ olur. Benzer olarak,

$$f(t + \Delta t + T/3) = f(t + \Delta t + T/6) - f(t + \Delta t) \quad (9)$$

Eşitlik 9 da, $f(t)$ 'nin fonksiyon değerleri $t+T/3$ ve $t+T/2$ arasında 0'dan $T/6$ 'ya kadar, t ve $t+T/3$ arasında Δt olarak nokta nokta ifade edilmiştir. $t+T/2$ ve arasında kalan yarım periyot için $f(t)$ 'nin değeri, yarım dalga simetri özelliğinden hesaplanmıştır. Tam dalga şekli bir üçüncüsünden belirlenmiştir. Nyquist teoreminden, eğer k . harmonik bilinirse, $2k$ noktaları her bir periyot için örneklenmelidir. Böylece zaman aralığının adım büyüklüğü ifade edilmiştir. Fourier dönüşümü ve yarım dalga simetri kavramlarına dayanılarak, her yarım periyot için $3N$ noktaları örneklendiğinde, $x(n)$ ayrık zaman dalga şeklinin k . harmonik olan a_k aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$a_k = \frac{1}{6N} \sum_{n=0}^{6N-1} x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} \\ = \frac{1}{6N} \left[\sum_{n=0}^{3N-1} x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} + \sum_{n=3N}^{6N-1} x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} \right] \quad (10)$$

Parantez içindeki ikinci terim aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\sum_{n=3N}^{6N-1} x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} = \sum_{n=0}^{3N-1} x(n+3N) e^{-jk \frac{\pi}{3N} (n+3N)} \\ = \sum_{n=0}^{3N-1} -x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} e^{-jk\pi} \quad (11)$$

Eğer k çift sayı ise $e^{-jk\pi} = 1$ dir. Eşitlik 10 da iki terim iptal edilir ve a_k sıfır olur. Böylece $x(n)$ çift harmonik içermez. Eğer k tek sayı olursa, o zaman $e^{-jk\pi} = -1$ olur. İkinci terim ilk terime eşit olur ve aşağıdaki ifade elde edilmiştir.

$$a_k = \frac{1}{3N} \sum_{n=0}^{3N-1} x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} \quad (12)$$

Hat akımını bulmak için giriş gerilimi (v) verilir. Transformatörlerde harmonik hesaplama aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir.

$$v \xrightarrow{(a)} \lambda \xrightarrow{(b)} B \xrightarrow{(c)} H \xrightarrow{(d)} i$$

Yukarıdaki adımlar tek tek incelendiğinde;

- Bu, $\lambda = [vdt]$ dir ve yöntem $v(t) \xrightarrow{FFT} v(w)$, integral $\lambda(w) \xrightarrow{IFFT} \lambda(t)$, ile gerçekleşir. t , w sırası ile zaman ve frekans domenlerini gösterir.
- $\lambda = N.\phi = N.B.S$ eşitliğinde λ dan B hesaplanır.
- Tahmini mıknatıslama eğrisiyle B' den H belirlenir.

- $F=N.i=H.l$ eşitliğinde H' dan i hesaplanır.

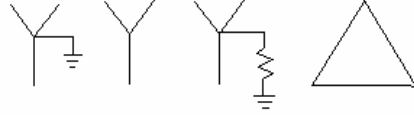
Yukarıdaki adımlar dalga şeklinin bir yarım periyodu içindir. Çünkü diğer yarım periyotlar, yarım dalga simetrik özelliğinden tanımlanır.

Transformatörlerin Farklı Bağlantı Şekillerinde Gerilim Dalga Şekilleri

Üç faz transformatör gurupları için değişik bağlantı tipleri mevcuttur. Primer sargılarındaki bağlantılar şekil 2' de gösterilmiştir. Topraklı yıldız bağlantı için herbir transformatörün gerilimi biliniyorsa, hat akımı tek faz durumundaki gibi bulunur. Δ bağlantı için yöntem: $v_{ab} \rightarrow \lambda_{ab} \rightarrow i_{ab} \rightarrow i_a$ dır ve topraklı yıldız bağlantıda da aynıdır. Bu yüzden, Δ bağlantı için hesaplama yapılır. Giriş gerilimi hem sinüzoidal hem de değiştirilmiş dalga şeklindedir. Transformatörün farklı bağlantı şekillerinde, gerilim dalga şekilleri altı farklı durumda verilmiştir. Bu farklı durumlar;

- Birinci durum; topraklı yıldız, sin
- İkinci durum; topraklı yıldız, harm
- Üçüncü durum; topraklı yıldız, sin
- Dördüncü durum; topraklı yıldız, harm
- Beşinci durum; empedans topraklı yıldız, sin
- Altıncı durum; empedans topraklı yıldız, harm

Sin sinüzoidal giriş gerilimini, *harm* harmonik içeren ve değişken giriş gerilimini gösterir. Bu altı durumda akım dalga şekli ve spektrumları ele alınacaktır. Hat akımının hesaplanması için yineleyici yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 2. Primer sargıları için trafo bağlantıları

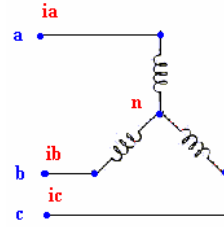
Topraklı Yıldız ve Empedans Topraklı Yıldız Bağlantıların Algoritmaları

İlk olarak, topraklı yıldız bağlantısı ele alınacaktır. Topraklı yıldız bağlantılı üç faz trafo grubu şekil 3 de gösterilmiştir. v_{an} hesaplanır i_a bulunur. Pozitif ve negatif sıralı harmonikler için v_{an} faz gerilimi v_{ab} hat geriliminden bulunur. Pozitif sıralı harmonikler,

$$v_{an} = v_{ab} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \quad (13)$$

Negatif sıralı harmonikler,

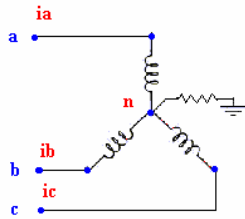
$$v_{an} = v_{ab} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \quad (14)$$



Şekil 3. Topraklı yıldız bağlantı

Sıfır sıralı harmonik içermeyen (i_a) hat akımının hesaplanması için (v_{an}) sıfır sıralı harmonikler hesaplanmalıdır. Yineleyici çözümün akış şeması şekil 13' de gösterilmiştir. Bilgisayar simülasyonunda H ve B hesaplama süresini kısaltmak için i_a v_{an} ile orantılı olmalıdır. B nin pozitif ve negatif sıralı harmonikleri (v_{an}) başlangıç değerinden hesaplanmıştır. Akış şemasının tekrarlanan kısmında i_a ve v_{an} H ve B ile yer değiştirir. Çıkış akımı i_a , H dan hesaplanmıştır. Empedans topraklı yıldız bağlantı için de

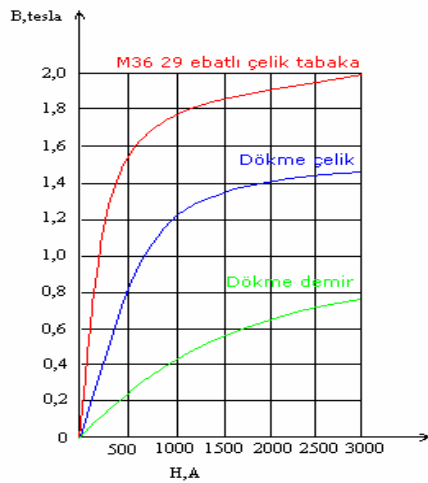
yineleyici yöntemlere başvurulmuştur. Şekil 4 de, empedans topraklı yıldız bağlantı gösterilmiştir. Z_n rezistansı toprağa bağlanır. Δi_a , i_a nın sıfır sıralı harmoniği olduğu varsayılır. Z_n geçen akım $3 \cdot \Delta i_a$ sıfır sıralı harmoniği içerir ve v_n / Z_n ye eşittir v_n gerilimi de sıralı harmonikleri içerir. v ve v_{an} aynı pozitif veya negatif sıralı harmonikler mevcuttur ve şekil 14' de verilen akış şemasından hesaplanmıştır.



Şekil 4. Empedans topraklı yıldız bağlantı

Simülasyon Sonuçları

Bilgisayar simülasyonu için kullanılan tek fazlı trafo 2kVA, 220/55 V, 50 Hz ve lamine tabakalı nüve tipindedir. Nüve çelik tabakalı M36 dır.



Şekil 5. Mıknatıslanma eğrisi

Transformatör verilere şunlardır; Primer sargı sayısı $N_1=220$, sekonder sargı sayısı $N_2=55$, yığınlama katsayısı $k_i=0.9$, sarım boşluk faktörü $k_w = 0.25$, kare nüve $c = 5.1$ cm., nüvenin alanı $=26.1$ cm², çelik alanı $= 23.4$ cm², pencere genişliğinin iki katı $d = 6.33$ cm., nüve çevresi merkez hattın toplam uzunluğu $= 58.38$ cm., beş ve altıncı durumlar için topraklama direnci 50Ω , sinüzoidal giriş gerilimi 380 V, frekans 50 Hz. dir. $w = 2 \cdot \pi \cdot f = 120 \cdot \pi$ rad/s olduğunda, hat toprak arası gerilim,

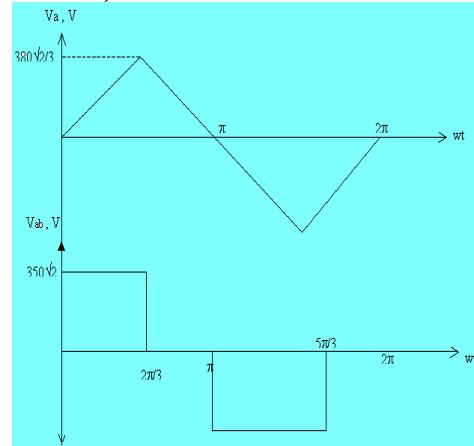
$$v_a = 380 \sqrt{\frac{2}{3}} \sin wt \quad (15)$$

dir. Fourier seri açılımları aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$v_a = 380 \sqrt{\frac{2}{3}} \times \frac{8}{\pi^2} (\sin wt - \frac{1}{9} \sin 3wt + \frac{1}{25} \sin 5wt - \dots) \quad (16)$$

$$v_{ab} = 350 \sqrt{2} \times \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\begin{aligned} & \cos(wt - \frac{\pi}{3}) - \frac{1}{5} \cos(5wt + \frac{\pi}{3}) + \\ & \frac{1}{7} \cos(7wt - \frac{\pi}{3}) - \dots \end{aligned} \right] \quad (17)$$

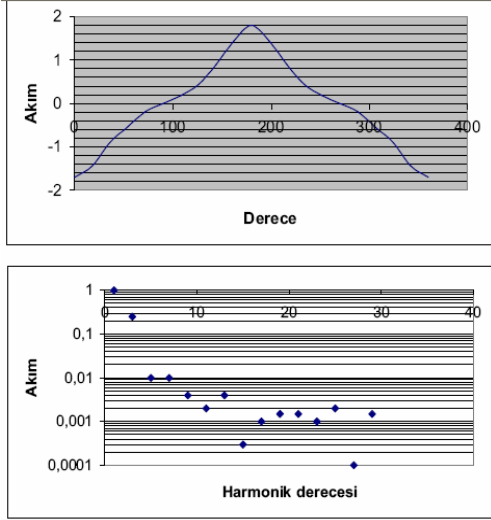
Şekil 6' da v_a topraklı yıldız ve empedans topraklı yıldız bağlantıda hat toprak gerilimi gösterilmiştir.



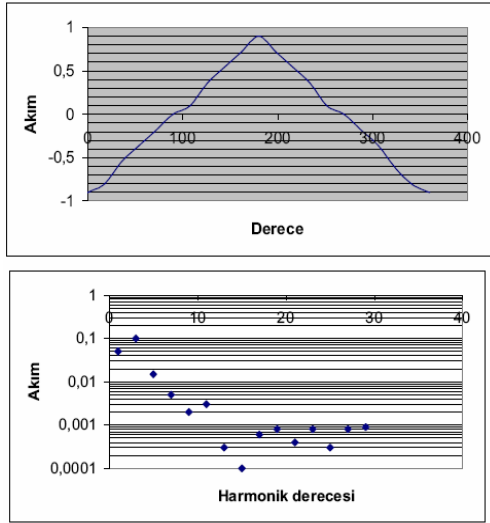
Şekil 6. Bozulmaya uğrayan giriş gerilimi

Bu simülasyonda periyotta 60 nokta örneklenmiştir. Bu yüzden, açı aralığı 6° ve en yüksek harmonik 29 alınmıştır. Simülasyon programında birçok yineleyici yöntem uygulanır. Üçüncü ve dördüncü durumlarda hatanın hesaplanmasında B akı yoğunluğu

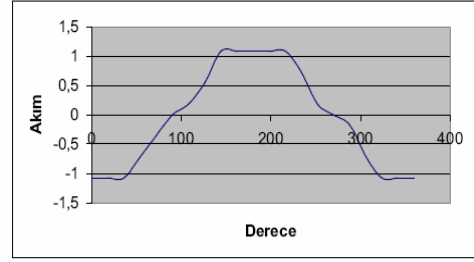
İçin verilen maksimum değer 0.0001 tesla dır. Beşinci ve altıncı durumlar için verilen maksimum hata gerilimi (v_{an}) için 10 milivolt ve maksimum hata % 0.01 mertebesindedir. Her bir durum için akım dalga şekli ve spektrumu şekil 7, 8, 9, 10, 11, 12 de gösterilmiştir.



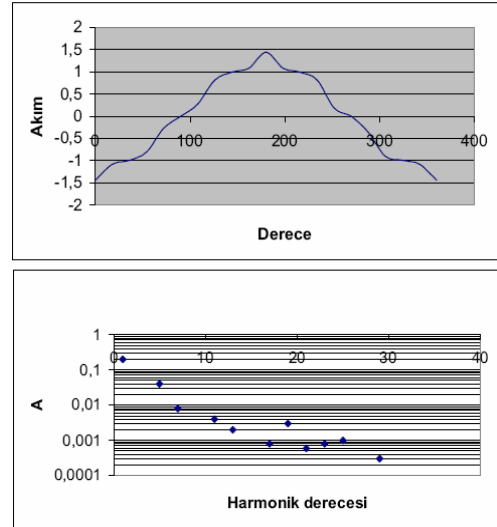
Şekil 7. Birinci durum için akım dalga şekli ve spektrumu



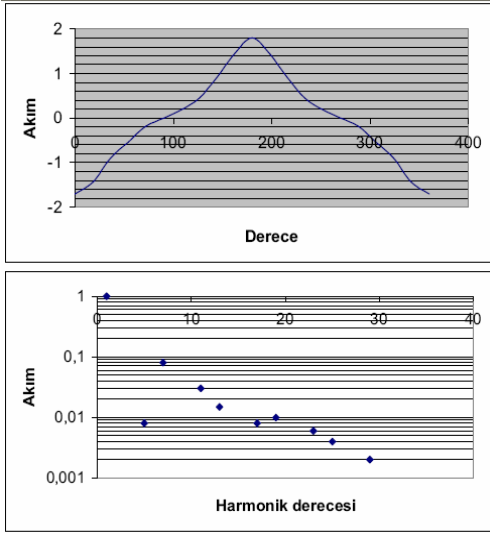
Şekil 8. İkinci durum için akım dalga şekli ve spektrumu



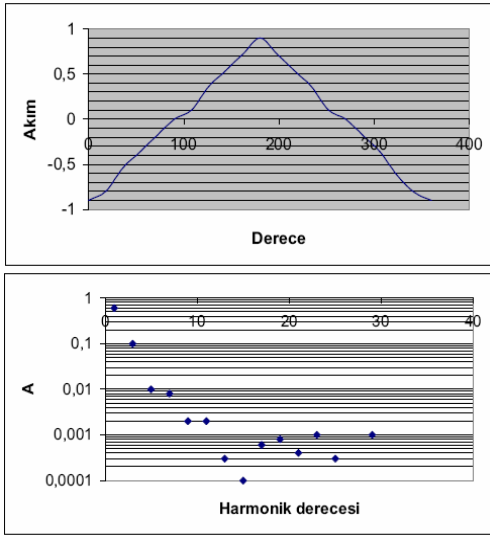
Şekil 9. Üçüncü durum için akım dalga şekli ve spektrumu



Şekil 10. Dördüncü durum için akım dalga şekli ve spektrumu



Şekil 11. Beşinci durum için akım dalga şekli ve spektrumu



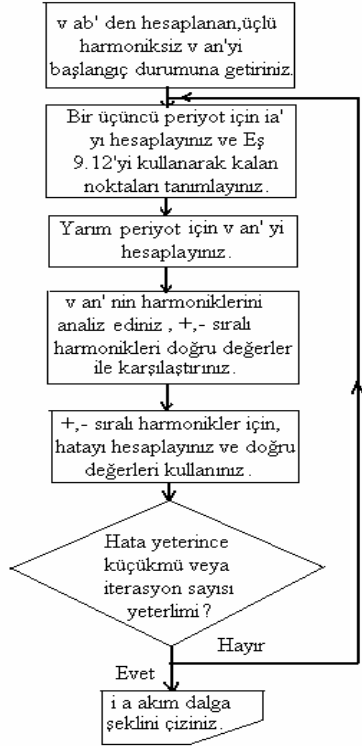
Şekil 12. Altıncı durum için akım dalga şekli ve spektrumu

Çizelge 2' de, distorsiyon katsayısı DK, maksimum akı yoğunluğu B_m , maksimum akım i_m , temel efektif akım i_1 , iterasyon sayısı NI ve hata verilmiştir.

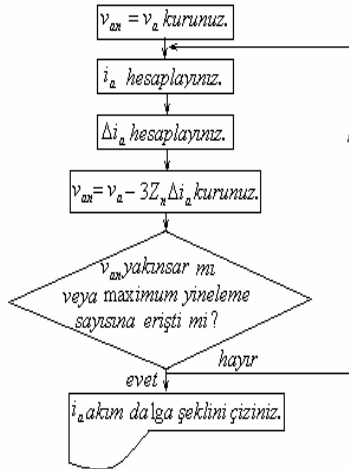
Çizelge 2. Simülasyon çıkış verileri

	DK	B_m tesla	i_m (A)	i_1 (A)	NI	Hata
1.D	26,23%	1,59	1,695	0,9399		
2.D	16,64%	1,25	0,887	0,5437		
3.D	9,85%	1,38	1,116	0,8416	7	4,947 $\times 10^{-5}$ tesla
4.D	9,38%	1,49	1,39	0,8758	9	7,510 $\times 10^{-5}$ tesla
5.D	24,98%	1,58	1,655	0,9296	11	5,005 $\times 10^{-3}$ tesla
6.D	16,26%	1,25	0,88	0,5425	7	5,922 $\times 10^{-3}$ tesla

Akım dalga şekilleri, ara tahmin ile elde edilmiştir. Yukarıda verilen şekillerden üç ve dört durumları için dalga şekilleri çift ve üçlü harmonikleri olmayan yarım dalga simetrik dalga şekilleri olduğu görülmüştür. Elde edilen akı yoğunluğu küçük ise iki ve altıncı durumlar için dalga şekilleri, bir ve beşinci durumlardaki dalga şekillerine göre daha küçük distorsiyon faktörüne sahip olduğu görülmüştür. Manyetik doymanın etkisinden dolayı son akımlar öncelikle göre daha büyüktür. Üçüncü ve dördüncü durumdaki dalga şekilleri, eğer üçlü harmonikler mevcut değilse küçük distorsiyon faktörüne sahiptir. Bununla birlikte, dördüncü durumdaki akım dalga şekli keskin bir şekilde değişmiştir ve spektrumunda ise daha yüksek dereceli harmonikler mevcuttur. Bunun sebebi, giriş gerilimi (v_{ab}) nin eşitlik 17' de gösterildiği gibi yüksek harmonikli dalga şekli olmasıdır. Bir ve ikinci durumlardaki dalga şekilleri beş ve altıncı durumdaki dalga şekillerine benzerdir. Sadece topraklama direncinde farklılık olur. Eğer, iki kez örnekleme frekansı ile elde edilen sonuç akımları yaklaşık olarak elde edilen doğruluk yeterlidir. Yineleyici yöntemlerde iterasyon sayısı genellikle 10 dur. Akım dalga şekilleri takriben $-\cos wt$ şeklindedir. Giriş hat-toprak geriliminden $-\cos wt$ nin manyetik akı fonksiyonunu elde etmek için integrali alınır.



Şekil 13. Topraksız yıldız bağlantının akış şeması



Şekil 14. Empedans ile topraklanan yıldız bağlantının akış şeması

Birinci ve dördüncü durumlarda akım dalga şekillerinin simetrik özelliği çifttir. Birinci ve ikinci durumlarda analitik metoda başvurulurken, üçüncü ve dördüncü durumlarda ise sayısal yöntemlerle sonuçlar

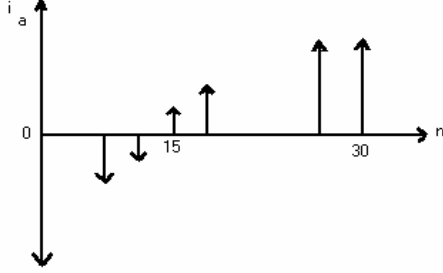
doğrulanmıştır. İki giriş gerilimi tek simetrik ve fourier serileri sadece sinüs ifadeleri içerir. İntegralden sonra akı çizgileri sadece kosinüs ifadeleri içerir ve çift simetrik. Miknatıs eğrisini çizerek elde edilen akım dalga şekilleri de aynı zamanda çift simetrik ve sadece kosinüs ifadeleri içerir. Bilgisayar verilerinden k. harmonik için faz açısı θ_k sıfır veya π dir ve eşitlik 18' deki fourier serileri sadece kosinüs ifadeleri içerir. İkinci durum için şekil 12'deki v sıfır dc bileşenin parabolik akı çizgisinden dalga şeklini elde etmek için integrali alınır. $\lambda_{max} = 380 \sqrt{2} / \sqrt{3} / 8 / 60 = 0,6464$ Wb, ve karşılık gelen $B_{max} = \lambda_{max} / 220 / 0.00234 = 1.2556$ tesla değeri çizelge 2' de verilen nümerik sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Eşitlik 17 dördüncü durumda, v_{AB} 'nin fourier serisidir ve eşitlik 13 ve eşitlik 14 ü kullanarak v_{AN} nin doğru pozitif ve negatif sıralı harmonikleri hesaplanmıştır. Böylece,

v_{an} (+,- sıralı)

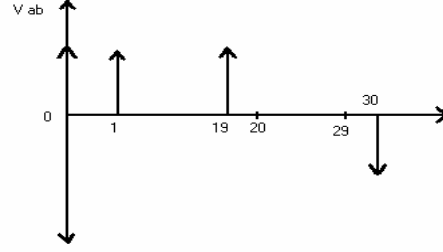
$$= \frac{700\sqrt{2}}{\pi} \left[\cos\left(7\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{5} \cos\left(5\omega t + \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{7} \cos\left(7\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - \dots \right]$$

$$= \left[\frac{700\sqrt{2}}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right) \right] \quad (18)$$

dir. İntegralden sonra, akı çizgisi (+,- sıralı) sadece kosinüs terimleri içerir. Eğer sıfır sıralı harmonikler sadece kosinüs terimleri içerirse, akı çizgisi çift simetrik olacaktır. Bu yüzden, miknatıs eğrisinden hesaplanan akım aynı zamanda simetrik ve sadece kosinüs terimleri içerir. Aynı sebeplerle çift simetrik akım özelliği için üçüncü duruma başvurulur. Bu birinci ve ikinci durum için dalga şekli ve faz açılarının her ikisi üçüncü durum için kontrol edilir. Bununla birlikte dördüncü durumda daha az farklılık bulunur. Bilgisayar verilerinden ayrı zaman çözümü, şekil 15' de gösterilmiştir ve $i_a(15) = -i_a(14)$, $i_a(16) = -i_a(13)$, ... ve $i_a(30) = -i_a(0)$ ' dir.



Şekil 15. Dördüncü durum için ayrı zaman akım dalga şekli



Şekil 16. Simülasyon için v_{ab} ayrık-zaman dalga şekli

Örnekleme aralığı 6° olarak alınmıştır. i_a $n=14.5$ de tek simetrik ve $n=29.5$ de çift simetriktir ve şekil 10' da verilen dalga şeklinden anlaşılır. Noktalı hat simetrik eksenini ifade eder. Birinci ve üçüncü durumlar için $i_a(15)=0, i_a(16)=-i_a(14)$ ve i_a $n=15$ de tek simetriktir ve $n=30$ da çift simetriktir. Bu yüzden, simetrik eksenini 3° lik zaman aralığının sol yarım kısmına kaydırılır. Bu, aşağıda verilen faz açısı ve fourier serileriyle kontrol edilir.

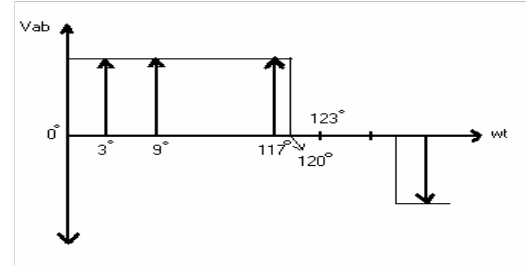
$$i_a(wt) = a_1 \cos(wt - 177^\circ) + a_5 \cos(5wt + 15^\circ) + a_7 \cos(7wt - 159^\circ) + \dots \quad (19)$$

dir. $f(wt)$ $i_a(wt)$ 3° lik gecikmeli olduğunu kabul edelim. O zaman,

$$f(wt) = i_a(wt - 3) = -a_1 \cos wt + a_5 \cos 5wt - a_7 \cos 7wt - \dots \quad (20)$$

dir. $f(wt)$ sadece kosinüs terimleri içerir ve $wt = 180^\circ$ ($n=30$) da çift simetriktir. Eğer $i_a(wt)$ $f(wt)$ 'den 3° ilerde ise, $i_a(wt)$ $wt=177^\circ$ ($n=29.5$) yönünde çift simetriktir. Akım dalga şekli sadece kosinüs terimleri içermelidir ve $wt = 180^\circ$ yönünde çift simetriktir. V_{ab} 'nin örnekleme aralığında 3° lik bir hata oluşmuştur. Simülasyon için V_{ab} ayrık zamanı şekil 16'da gösterilmiştir. Şekil 16'nın V_{ab} 'si şekil 17'dekinden 3° ileridir. Böylece kesin cevap simülasyon sonucundan 3° geridedir ve simetrik eksenle 3° uyumludur.

V_{ab} şekil 17'de gösterildiği gibi örnekleştir.



Şekil 17. v_{ab} nin örnekleme aralığı

Sonuç

Simülasyon sonuçları başarılı olmuştur. Çünkü her bir yineleyici metot en güzel bir şekilde yakınsamıştır. Elde edilen doğruluk derecesi mıknatıslama eğrisinin tahmininde kullanılan doğrusal kısımların sayısına bağlıdır. Her yüksek harmonik uygun bir şekilde örnekleme frekansında tahmin edilmiştir. Eğer giriş gerilimi topraklı yıldız veya topraklı yıldız bağlantı durumunda tek (veya çift) simetrik olur ise, o zaman akım dalga şekli çift (veya tek) simetrik olacaktır. Bu simülasyon programı ile transformatörlerin tasarımında harmonik analiz yapılır.

Kaynaklar

- [1] Baghzouz, Y., Gong, X.D., (1992), " Voltage-Dependent Model for Teaching Transformer Core Nonlinearity ", IEEE

- Transactions on Power Systems, Vol. 8,
No. 2, 746-752.
- [2] Electrical Transmission and Distribution,
Westinghouse, 116-120
- [3] Lin, C. E., (1993). “Investigation of
Magnetizing Inrush Current In
Transformers. Part II – Harmonic
Analysis” IEEE Transaction on Power
Delivery, Vol:8, No:1, 255-263
- [4] Lin, C. E., (1993). “Investigation of
Magnetizing Inrush Current In
Transformers. Part II – Harmonic
Analysis” IEEE Ttransaction on Power
Delivery, Vol:8, No:1, 255-26

Geliş Tarihi: 04/05/2006

Kabul Tarihi: 31/01/2008