

FERROREZONANS VE AŞIRI GERİLİMLERDEN KORUNMAK İÇİN MATEMATİKSEL MODEL

S. İ. HASANOV¹, A. M. HAŞİMOV², A. NAYIR³, Y. V. DİMİTRİYEV⁴, İ. R. PİVÇİK⁵

^{1,2,4,5} Azerbaycan İlimler Akademisi, Fizik Enstitüsü,

Yüksek Gerilimlerin Fiziği ve Tekniği Laboratuvarı
370143, Hüseyin Cavid Prospekti, 33,
Bakü, Azerbaycan

⁽³⁾ İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü
Maslak, İstanbul

e-mail: ahmetnayir@hotmail.com

Anahtar sözcükler: Ferrerrezonans, Aşırı Gerilim, Koruma

ÖZET

Ferreerzonansta ve yüksüz baraların geçici rejimlerinde aşırı gerilimler oluşmaktadır. Bu olayla yüksek gerilim aygıtlarının zarar görmesi sonucu elektrik şebekelerinde arızalar ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada bu gibi aşırı gerilimlerden korunmak için bir matematiksel model önerilmiştir.

1. GİRİŞ

Ferreerzonans aşırı gerilimi; endüktif gerilim transformatörlerine (GT) sahip dağıtım şebekelerinde, anahtarların ve kesicilerin kontakları kapasitif gerilim bölücülerle donatıldığı zaman oluşabilir.

Kaza sonucu açılan baraların normal çalışmaları sağlandığında, otomatik kapayan anahtarların kontakları arasındaki arkın geçici aşırı gerilimler oluşabilir.

Ferreerzonans aşırı gerilimi detaylı olarak araştırılarak, bu gibi aşırı gerilimlerin sınırlandırılması için değişik yöntemler teklif edilmiş ve uygun devreler önerilmiştir. Bu devreler GT'nin hem alçak, hem de yüksek gerilim taraflarına bağlamak için dikkate alınmıştır [1-4]. Bu devrelerden en etkilisi GT'nin alçak gerilim tarafına balast direncinin bağlanması ve bu sargısına dağıtım şebekesinden zıt gerilim vermektedir. GT'nin alçak gerilim uçlarına zıt yönde gerilim uygulandığında transformatörün manyetik devresinde söndürücü etki gösterir.

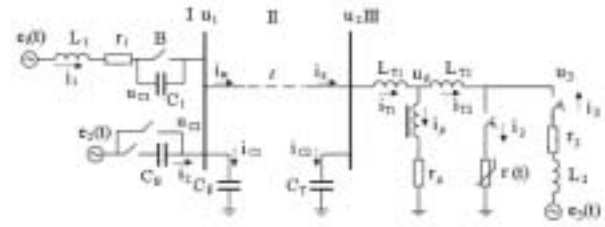
Geçici aşırı gerilim anahtarın kontakları arasındaki arkın sönmesi ile seri olarak artmaktadır. Bu durum artan aşırı gerilim olarak tanımlanmaktadır. Bu gerilimden korunmak için devre teklif edilmiştir.

Bu çalışmada, ferreerzonans aşırı gerilimlerinden korunma devrelerinden etkin şekilde yararlanarak geçici rejimlerdeki aşırı gerilimlerden korunmanın yolları incelenmiştir. Bunun için kurulacak matematiksel model ve bilgisayar programı çok önemlidir.

2. MODELİN SEÇİMİ

Karışık elektrik şebekelerinde elektromanyetik dalga olaylarının matematiksel modellenmesi yönteminden yararlanarak ferreerzonans aşırı gerilimlerinden korunmak için bilgisayar programı önerilmiştir.

Ferreerzonans aşırı gerilimini ve yüksüz baraların bağlanması sırasında oluşan aşırı gerilimi bir devre yardımı ile sınırlandırmak için seçilen hesaplama sistemi şekil 1'de gösterilmiştir.



Sistemin I. düğüm noktası için aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= L_1^{-1} [e_1(t) - r_1 i_1 - u_{c1} - u_1] \\ \frac{du_{c1}}{dt} &= C_1^{-1} \cdot i_1; \text{ eğer } C_1^{-1} \neq 0; i_1 \neq 0 \\ \frac{du_{c2}}{dt} &= C_B^{-1} \cdot i_2; \text{ eğer } C_B = 0; i_2 = 0 \\ \frac{du_1}{dt} &= C_w^{-1} \cdot i_{c1} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada $e_1(t) = u_{c2} + u_1$ ve $i_H + i_{C1} = i_1 + i_2$ dir. Hat başı akımı i_H elektrik iletim hattının hat denklemleri yardımı ile aşağıdaki denklemden bulunur,

$$i_H = (Z + Z_z)^{-1} (u_1 + v_q)$$

Buradaki katsayılar hattan elde edilir. Elektrik iletim hattının denklemlerini, iletkenlerde ve yerde deri olayını ve iletkenlerdeki korona boşalmasını dikkate alarak çeşitli hesaplama şekilleri verilmiş, uygun algoritmalar hazırlanmıştır [1-4]. Son yıllarda bu denklemlerin çözümü için yeni araştırmalar yapılmıştır. İletkenlerde korona boşalmasını geniş bir şekilde dikkate almak için A. Nayır tarafından hassas denklemler bulunmuştur [6-7]. Korona boşalmasının bu modelini dikkate alarak elektrik iletim hattının sonlu farklar yöntemi ile bulunan denklemleri aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$\begin{aligned} u_d - u_p + z(i_d - i_p) + h \left[z \varphi \left(\frac{\partial u_e}{\partial t}, u_e \right) + f \left(\frac{\partial i_e}{\partial t}, i_e \right) \right] &= 0 \\ -u_d + u_q + z(i_d - i_q) + h \left[f \left(\frac{\partial i_e}{\partial t}, i_e \right) - z \varphi \left(\frac{\partial u_e}{\partial t}, u_e \right) \right] &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Burada $z = (L_0 C_0^{-1})^{-0.5} l$ kayıpsız hattın dalga direnci; $u_d, u_p, u_q, u_e, i_d, i_p, i_q, i_e$ elektrik iletim hattının çözüldüğü $x = 0, x = l, t = 0$ ve t nin açık istikametinde koordinatları $(x, t), (x - h, t - \tau), (x + h, t - \tau), (x, t - \tau)$ olan noktalarda gerilim ve akımlardır.

Elektrik iletim hattının hat denklemlerinden yararlanarak v_r , için aşağıdaki ifade yazılır [7]:

$$v_q = -u_q(h, t - \tau) + z i_p(h, t - \tau) + \theta \gamma + z_n \sum_{k=1}^n \chi_k i_{fk}(t - 2\tau).$$

Sistemin III. düğüm noktası için aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\begin{aligned} \frac{di_{T_1}}{dt} &= L_{T_1}^{-1} (u_2 - u_\mu); \\ \frac{di_{T_2}}{dt} &= L_{T_2}^{-1} (u_\mu - u_3) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{C_2}}{dt} &= C_T^{-1} \cdot i_{C_2} \\ \frac{d\psi}{dt} &= (u_\mu - r_\mu \cdot i_\mu) \\ \frac{di_3}{dt} &= L_2^{-1} [e_3(t) - r_2 i_2 - u_3] \end{aligned}$$

Burada $i_{C_2} = i_k - i_{T_1}; i_{T_1} = i_\mu - i_{T_2};$

$$i_\mu = a_\psi + b_\psi^n + c_\psi^m, m > n$$

$$i_k = (Z + Z_n)^{-1} (v_p + u_i); u_3 = r(t) \cdot i_2;$$

$$i_2 = i_{T_2} + i_3$$

Sistemdeki $r(t)$ nonlinear direncin ani değerini hesaplamak için aşağıdaki denklemden yararlanılmıştır:

$$r(t) = \frac{u_r}{i_2} = u \cdot i_2^{-1}, \text{ veya } r(t) = r_0 |i_2|^{\alpha-1} \quad (4)$$

Burada u_r nonlinear direncin ani değeri; $u_r = r_0 i_2^\alpha$, α nonlinearlik katsayısı, r_0 bu direncin başlangıç değeri; $r_0 = u_r / i_2$, akımın değeri $i_2 = 1$ A olduğunda, başlangıç değeri r_0 gerilim düşümüne eşit olur.

4. HESAPLAMA ALGORİTMASI

Hesaplama algoritmasının sıralaması aşağıdaki gibidir: Hesaplama adımı h seçilir, sonra $\tau = h/v$, $v = 3 \cdot 10^5$ km/s, hesaplanır, elektrik iletim hattının ifadelerindeki katsayılar hesaplanır, korona boşalmasının karakterine uygun model seçilir. Sistemin I. düğüm noktasındaki birinci dereceden olan adi diferansiyel denklemler

$$y_i(t + \tau) = y_i(t) + K_{mi} + O(r^3) \quad (5)$$

Burada ki,

$$K_{mi} = h \varphi_i \left(t + \frac{\tau}{m - n + 2}; y_1 + \frac{K_{n-1,2}}{m - n + 2}, \dots \right)$$

ifadesinin yardımı ile çözülür [5]. Algoritmanın bu bölümünde verilen h ve τ -ya uygun olarak m katsayısı hesaplama zamanı bulunur;

- Ferorezonans aşırı gerilimi hesaplandığında B anahtarının kontaklarının açık olmasını taklit etmek için $L_1^{-1} = 0$ kabul edilir. Geçici aşırı gerilim hesaplandığında ise $C = 0$ kabul edilir;
- Sistemin II. bölümünde paylanmış parametrelili, uzunluğu l olan iletkenin ara noktalarındaki gerilim ve akım hesaplanır;
- Sistemin III. bölümündeki gerilimler ve akımlar (5) denklemleri yardımı ile bulunur. Bu denklemlerin çözümünde başlangıç koşulu olarak herhangi bir koruma şekli seçilir. Eğer ortaya çıkan ferorezonans ve geçici aşırı gerilimler $e_3(t)$ kaynağı yardımı ile söndürülürse, bu zaman $r(t)$ devreden çıkarılır. Bunun

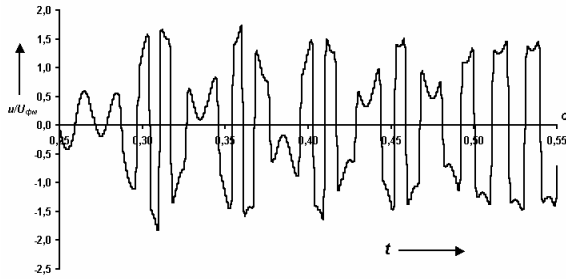
için $i_{\mu} = i_{T_1} + i_3$ kabul edilir. Eğer bu aşırı gerilimler $r(t)$ 'ye bağlı olarak sınırlandırılırsa, bu durumda $L_2^{-1} = 0$ kabul edilir.

Hesaplama, yeni t 'nin bilinen değerinde rejim değişikliği olursa, yani $e_3(t)$ veya $r(t)$ devreye bağlanırsa, hesaplama adımı azalır, katsayılar yeniden hesaplanır ve yeni adımla geçiş sürecindeki eğriler bulunur.

5. SONUÇLARIN ARAŞTIRILMASI

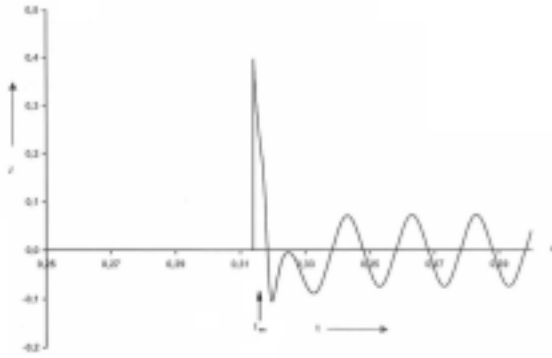
Gösterilen algoritmaya uygun olarak bilgisayar programları hazırlanmıştır. 330 kV gerimli endüktif GT'na sahip bir şebeke incelenmiştir. GT ile anahtar arasındaki l mesafesinin uzunluğu 100 m kabul edilmiştir.

Ferrorezonans aşırı geriliminin $e_3(t)$ ve $r(t)$ ile sınırlandırılması incelenmiştir. Bu durumda $L_1^{-1} = 0$, $L_2^{-1} = 0$ kabul edilir. Ferrorezonans aşırı geriliminin değişimi şekil 2'de gösterilmiştir.

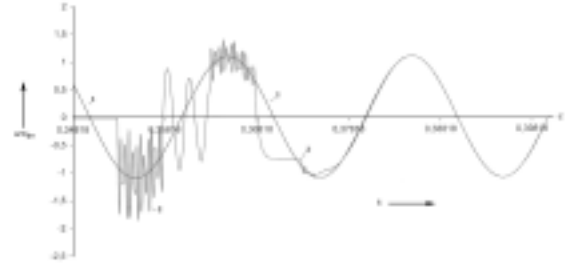


Şekil 2. Ferrorezonans geriliminin zamanla değişimi

Aşırı gerilimin maksimum değeri $1,6 U_m$ 'ye eşit olur. Bu sonuç ferrorezonans olaylarında esas kabul edilmektedir. Ferrorezonans aşırı gerilimini sınırlandırmak için devreye $r_0 = 0,2$ ohm, $\alpha = 0,9$ olan nonlineer direnç devreye bağlandığında sonuçlar şekil 3a ve 3b'de gösterilmiştir.



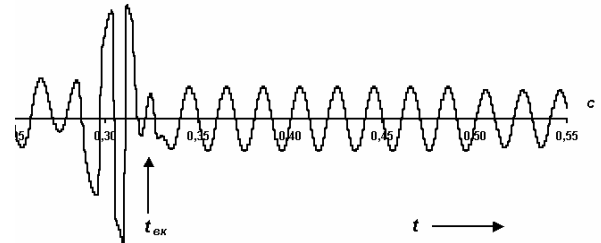
Şekil 3a. Ferrorezonans aşırı gerilimi sınırlandırıldığında akım eğrisi.



Şekil 3b. Ferrorezonans aşırı gerilimi sınırlandırıldığında gerilim eğrisi.

Hesaplama $t = 0,314$ s de direnç devreye bağlanır. Bu durumda ferrorezonans söner, gerilimin kararlı durum değeri $0,5 U_{\phi M}$ olur. Maksimum akımın akım süresi 0,004 s den uzun olmaz.

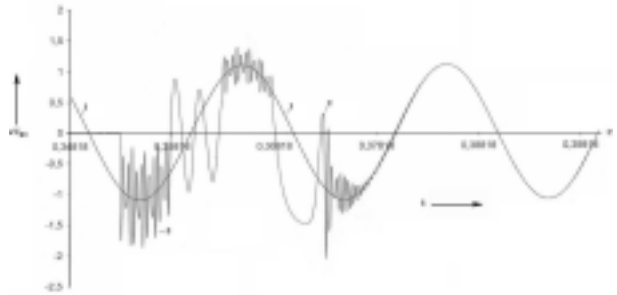
Ferrorezonans olayını sınırlandırmak için $e_3(t)$ bağlandığında sonuç şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Ferrorezonansın $e_3(t)$ yardımı ile sınırlandırılması

Burada $e_3(t)$ zıt gerilim kaynağı, $t = 0,314$ s olduğunda bağlanır. Ferrorezonans söner ve gerilim $0,5 U_{\phi M}$ den büyük olmaz.

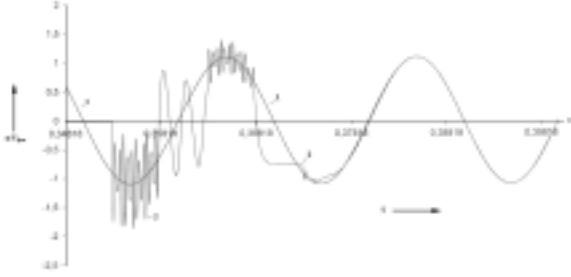
Yapılan araştırmalar ve pratik deneyimler ikinci yöntemin daha da güvenilir olduğunu göstermektedir. Ferrorezonans olayında seçilen bu değerler geçici aşırı geriliminin sınırlandırılmasında denenmiştir. Devreye $r(t)$ direnci ve $e_3(t)$ kaynağı bağlanmadığında geçiş sürecinde artan aşırı gerilimin eğrisi şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Baralara bağlantı olduğundaki aşırı gerilimler

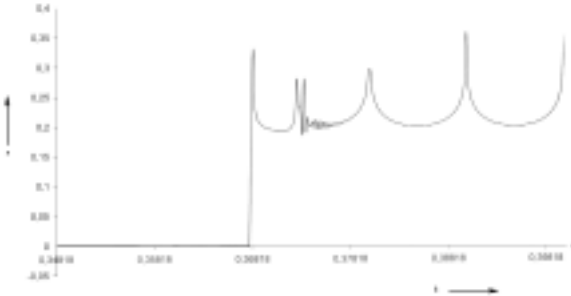
Burada $t = 0,353$ s olduğunda bara devreye bağlanır. Bu durumda $i_2 = 0$ kabul edilir. Yüksek frekanslı aşırı gerilim oluşur. 2 eğrisi şekil 5'te karşılaştırma için kaynağın gerilimine bağlanmıştır.

Hesaplama $t = 0,358$ s anı B anahtarının kontakları arasındaki arkın sönme anıdır. Arkın yeniden tutuşması $t = 0,373$ s de oluşur ki, bu zaman diliminde aşırı gerilimin değeri $2,5U_{\phi M}$ olur. Aşırı gerilimi sınırlandırmak için $r(t)$ direnci bağlandığında alınan sonuç şekil 6'da verilmiştir.



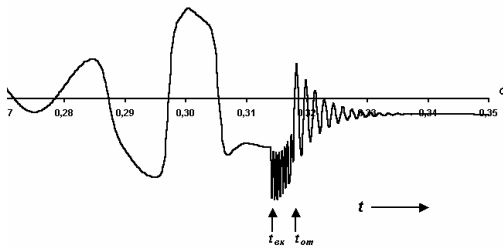
Şekil 6. $r(t)$ bağlandığında aşırı gerilimin sınırlandırılması

Anahtarın kontakları arasındaki arkın başlaması ve sönmesi önceki zamanlarla aynıdır. Nonlinear direncin zamanla değişimi şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Nonlinear direncin zamanla değişimi

Direncin değeri ilk olarak r_0 a göre iki defa değişir. Yüksek frekanslı aşırı gerilimi sınırlandırmak için $e_3(t)$ kaynağından besleme yapıldığında alınan sonuç şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. $e_3(t)$ kaynağından besleme yapıldığında geçici aşırı geriliminin sınırlandırılması

Anahtarın kontakları arasında arkın tutuşması ve sönmesi anları şekilde gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, GT nin alçak gerilim tarafına şebekeden $e_3(t)$ kaynağı bağlandığında, ferorezonans aşırı gerilimi ile birlikte, geçici aşırı gerilimi de sınırlandırmış olur.

Ferorezonans aşırı geriliminin ve geçiş sürecinde oluşan aşırı gerilimin birlikte sınırlandırılması için iki yöntemle inceleme yapıldı.

6. SONUÇLAR

Yüksek gerilim şebekelerinde aşırı gerilimleri hesaplamak, sınırlandırmak ve korumayı sağlamak için bilgisayar modellemesinde kullanılabilecek matematiksel model ve algoritma önerilmiştir. Bu algoritma ferorezonans ve geçici yüksek frekanslı aşırı gerilimlerden korunma devrelerinin laboratuvar koşullarında modellerini kurmaya imkan verir.

Elektrik şebekelerinin güvenliğini ve onların aygıtlarını ekonomik olarak daha elverişli yöntemlerle aşırı gerilimlerden korumak için ferorezonans aşırı geriliminin ve yüksek frekanslı geçici aşırı gerilimin bir devreden yararlanarak sınırlandırılmasının mümkün olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] D. Klaus-Dieter, H. Klaus, K. Reinhard, "Ferorezonanz vor allem in Netzen mit Spannungswandler", ETZ: Elektrotechen. Z., 1988, No. 17, pp. 780-783.
- [2] D. Klaus-Dieter, H. Klaus, K. Reinhard, "Ferorezonanz vor allem in Netzen mit Spannungswandler, Teil 2: Abhilfemaßnahmen bei verschiedenen Netzanlagen", ETZ: Elektrotechen. Z., 1988, No. 19, pp. 900-904.
- [3] C. D. Ray, W. George "Large mill power outages caused by potential transformer ferorezonance", IEEE Trans. on Industrial Applications, 1988, Vol. 24, No. 4, pp. 635-640.
- [4] K. M. Antipov, Ç. M. Cuvanlı, Y. V. Dimitriyev, "Elektromanyetik transformatörlü, kapama sistemli ve gerilim bölücülü 110/500 kV'luk şebekede ferorezonansın önlenmesi için notlar", Kiev, UNPD, Energoproses, 1995, s. 34.
- [5] Ç. M. Cuvanlı, Y. V. Dimitriyev, A. M. Haşimov, "Yüksek gerilimli elektrik şebekelerinin güvenliğinin artırılması probleminde matematik modelleme", Azerbaycan İlimler Akademisi Haberleri, 1999, No. 6, s. 128-133.
- [6] A. Nayır, "Sistemlerarası elektrik iletiminde kaza açılmalarından oluşan gerilimlerin modelleri", Autoreferat, Bakü, Elm, 2001, s. 18.
- [7] A. Nayır, A. Haşimov, Y. V. Dimitriyev, "Elektrik iletim hatlarında kaza açılmalarından oluşan gerilimlerin modelleri", Bakü, Elm, 2002, s. 191.