

GÜÇ SİSTEMLERİ KONFERANSI IV



OVAL SARGILI 12-DARBELİ DENEY TRANSFORMATÖRÜNDE KAÇAK REAKTANS MATRİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

Yunus Berat Demirel
Elektrik Yük. Müh.
Genetek Güç Enerji Ltd. Şti.

Bora Alboyacı
Prof. Dr.
Kocaeli Üniversitesi

Mehmet Aytaç Çınar
Doç. Dr.
Kocaeli Üniversitesi

İbrahim Gürsu Tekdemir
Dr. Öğr. Üyesi
Bursa Teknik Üniversitesi

Rukiye B. Aymaz
Arş. Gör.
Kocaeli Üniversitesi

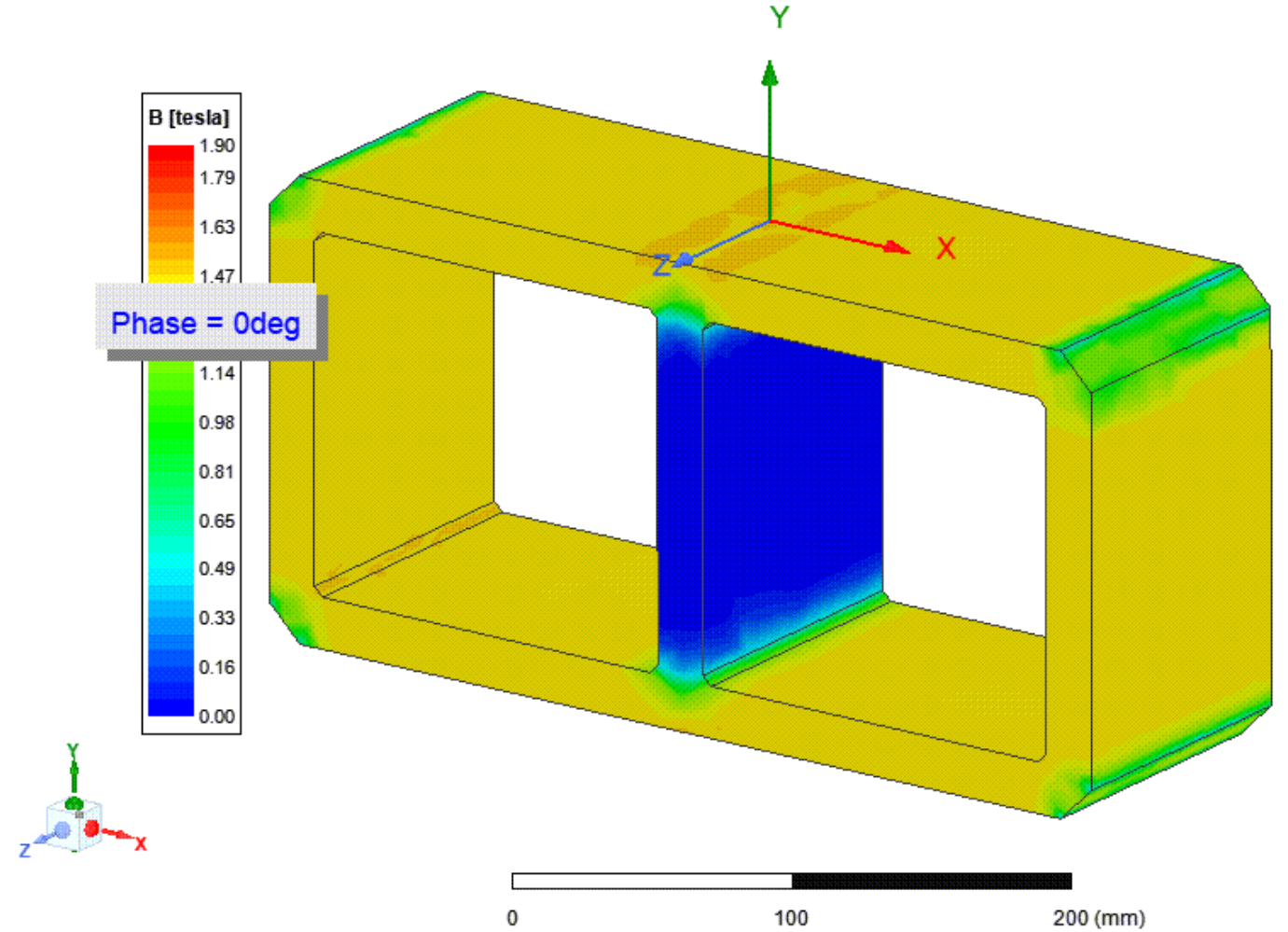
Bildiri ID Numarası: 0134



GENETEK

İÇİNDEKİLER

- 1 Giriş
- 2 Transformatörde Empedans Matrisi
- 3 Kaçak Reaktans: Teorik yaklaşım
- 4 Sonlu Elemanlar Yöntemi
- 5 Transformatör Özellikleri
- 6 Sonlu Elemanlar Modeli
- 7 Analiz Çalışmaları
- 8 Test Çalışmaları ve Sonuçlar



Konverter transformatörleri:

- 12-pulse
- 24-pulse
- 36-pulse
- ...

Kullanım alanları:

- Rüzgar, güneş enerjisi santralleri
- Depolama tesisleri
- Raylı ulaşım sistemleri
- Demir-çelik endüstrisi
- ...

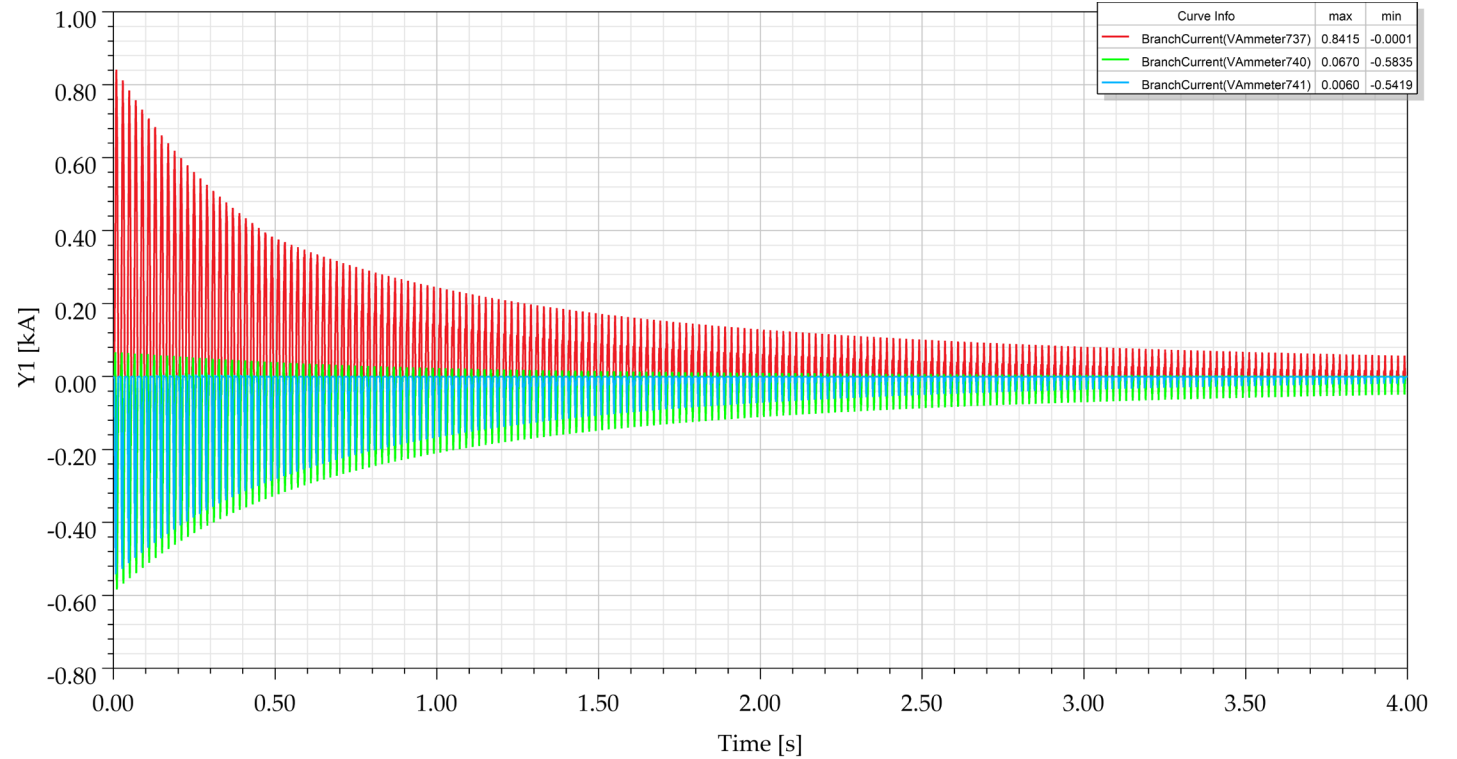


Elektriksel parametreler:

- Empedans matrisi
- Boşta ve yükte çalışma kayıpları
- Kapasitans değerleri
- Inrush akımı
- ...

Sistem içinde etkilenen analizler:

- Yük akış analizleri
- Kısa devre analizleri
- Koruma-koordinasyon analizleri
- ...



Transformatörlerde Empedans Matrisi

Empedans Matrisleri:

- %U_k
- %U_x
- %U_r
- L (kaçak indüktans)

Kısa devre empedansı bileşenleri:

$$\%U_k = \sqrt{\%U_x^2 + \%U_r^2}$$

Tek sekonder durumunda matris Boyutları

- 12-pulse: 2x2
- 24-pulse: 4x4
- 36-pulse: 6x6
- Matris boyutları farklı sargıların kombinasyonlarına göre arttırılabilir.
(HV-(Sekonder1+Sekonder2))

	HV	Sekonder1	Sekonder2	Sekonder3	Sekonder4
HV		xxx	xxx	xxx	xxx
Sekonder1			xxx	xxx	xxx
Sekonder2				xxx	xxx
Sekonder3					xxx
Sekonder4					

Kaçak reaktans: Teorik yaklaşım

Standart silindirik sargı yapısına sahip iki sargılı transformatörlerde kaçak reaktans aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilir.

$$\%X = 2.48 \times 10^{-5} \cdot f \frac{(\text{Amper} * \text{sarım})}{H_{eq} \left(\frac{\text{Gerilim}}{\text{Sarım}} \right)} \sum_{k=1}^n ATD$$

$$\sum ATD = \frac{1}{3} (T_1 \times D_1) + (T_g \times D_g) + \frac{1}{3} (T_2 \times D_2)$$

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R}$$

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w / (T_1 + T_g + T_2)}}{\pi H_w / (T_1 + T_g + T_2)}$$

T_1 = Birinci sargının kalınlığı

T_2 = İkinci sargının kalınlığı

T_g = Sargılar arasında bulunan boşluğun kalınlığı

D_1 = Alçak gerilim sargısının ortalama çapı

D_2 = Yüksek gerilim sargısının ortalama çapı

D_g = Hava aralığının ortalama çapı

H_w = Sargı yüksekliği

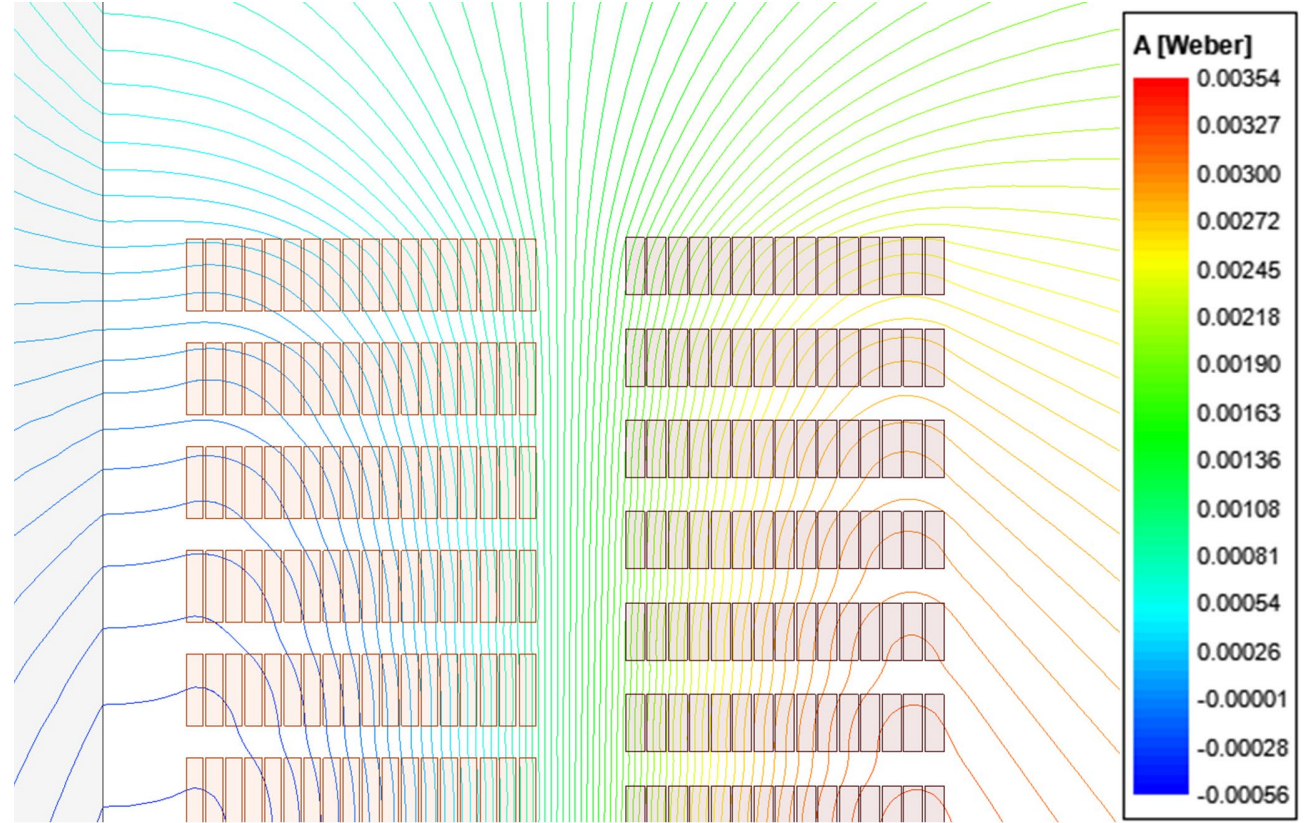
K_R = Rogowski faktörü

ATD = Amper*sarım

Kaçak reaktans: Teorik yaklaşım

Kısıtlar:

- Radial alanlardan dolayı gelen reaktansın tam olarak değerlendirilememesi
- Yüksekliği düşük sargılarda sapmanın artması
- Oval yapıda sargılar için direkt olarak kullanılamaması
- Paralel sargı yapısı bulunan trafolarda sargılar arasındaki kuplajın hesaba dahil edilememesi
- Kazan duvarları ve devre tutucuların reaktans artışına etkisinin hesaba dahil edilememesi
- Bara elemanlarının reaktans artışına etkisinin hesaba dahil edilememesi



Sonlu Elemanlar Yöntemi

- Karmaşık geometrilerde olan güç sistemi ekipmanlarının elektriksel parametrelerinin teorik yöntemler ile hesaplanması mümkün olmamaktadır. Bu durumda nümerik çözüm yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile analiz çalışmaları yapılabilmektedir.
- Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili geometri üzerinde bir ağ yapısı oluşturulmakta ve ağ yapısı üzerinde Maxwell denklemleri çözülmektedir.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \mu_r \left(J + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E}{\partial t} \right)$$

E : Elektrik alan şiddeti (V/m),

B : Manyetik akı yoğunluğu (T),

J : Akım yoğunluğu (A/m²),

ρ : Yük yoğunluğu (C/m³),

ϵ_0 : Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği,

ϵ_0 : Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği,

ϵ_r : Malzemenin elektriksel geçirgenliği,

μ_0 : Serbest uzayın manyetik geçirgenliği,

μ_r : Malzemenin manyetik geçirgenliği,

σ : Elektriksel iletkenlik (S/m)

Modelleme Eksenleri:

- 3D
- 2D XY (Kartezyen sistem)
- 2D RZ (Silindirik eksen)

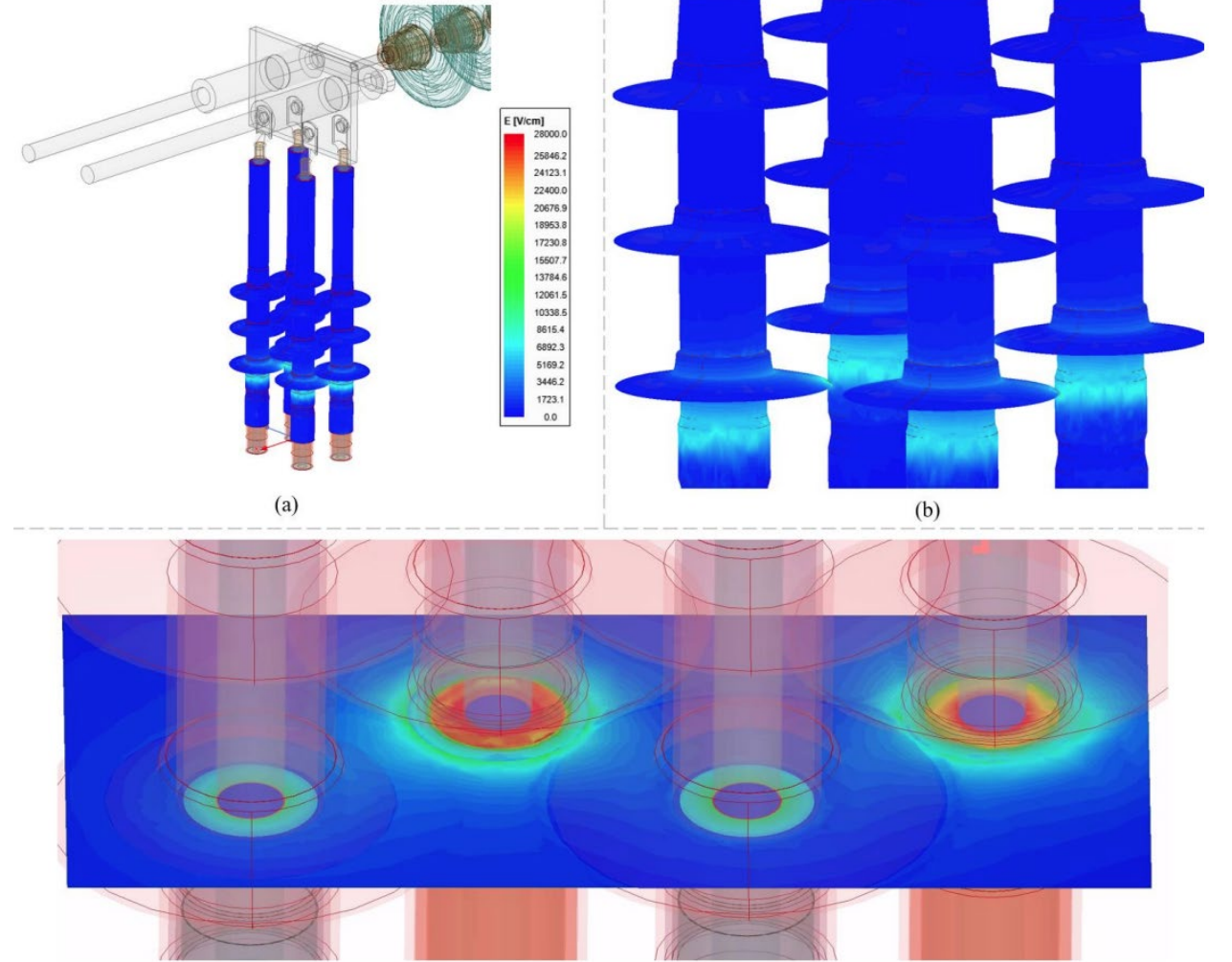
Çözücüler:

- Magnetostatic
- Eddy
- Transient
- Electrostatic
-

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Güç Sistemi Ekipmanlarında Örnek FEM Analizleri

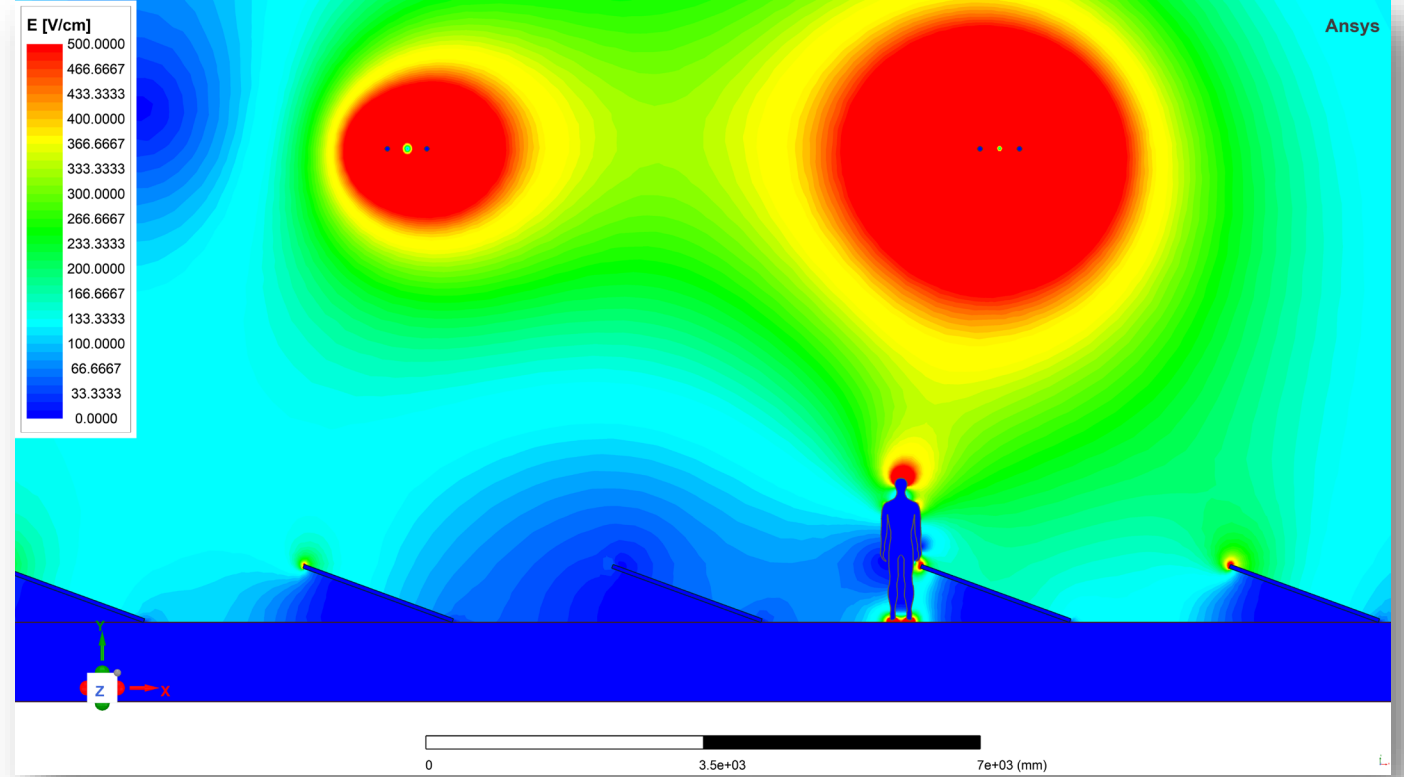
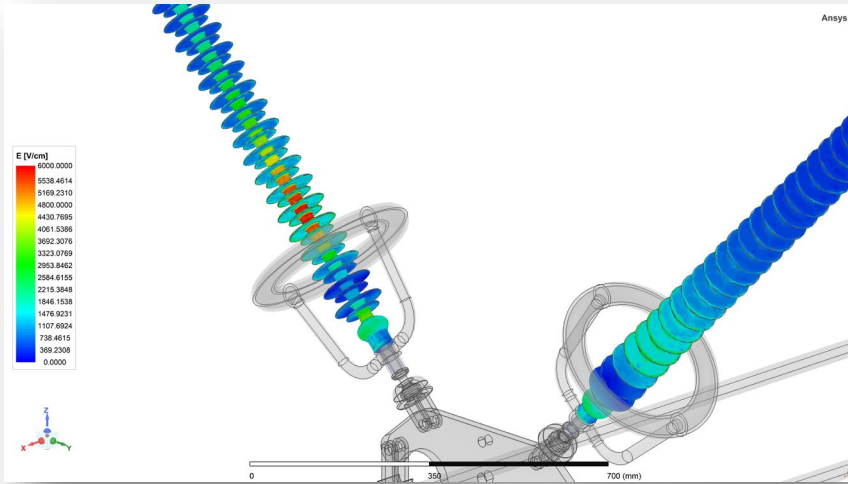
- Güç kabloları: Dengesiz yüklenme, ekran akımı, ekran gerilimi, kayıp, harmonikli yüklenme, elektrik alan dayanımı...
- Kablo başlıkları: Kritik elektrik alan dağılımı
- Transformatörler: %Uk, Inrush, Eddy kaybı, kısa devre dayanımı, elektrik alan dayanımı...
- Reaktörler: İndüktans, kayıp, manyetik alan...



Sonlu Elemanlar Yöntemi

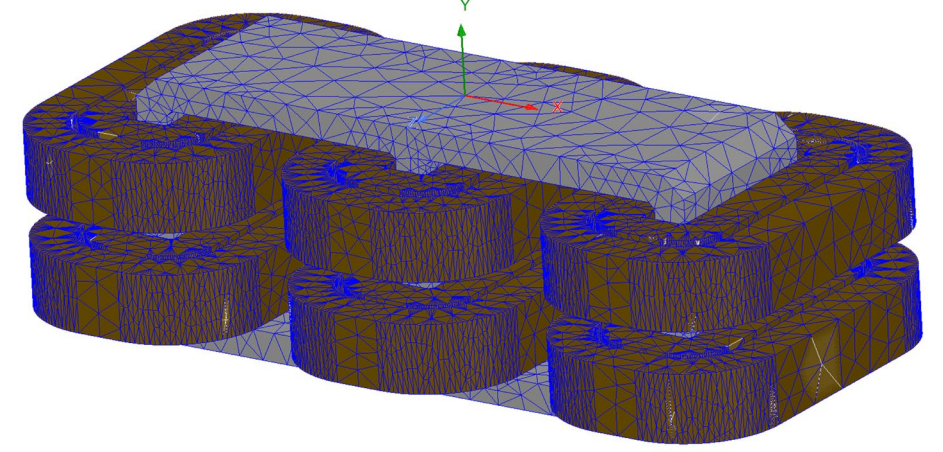
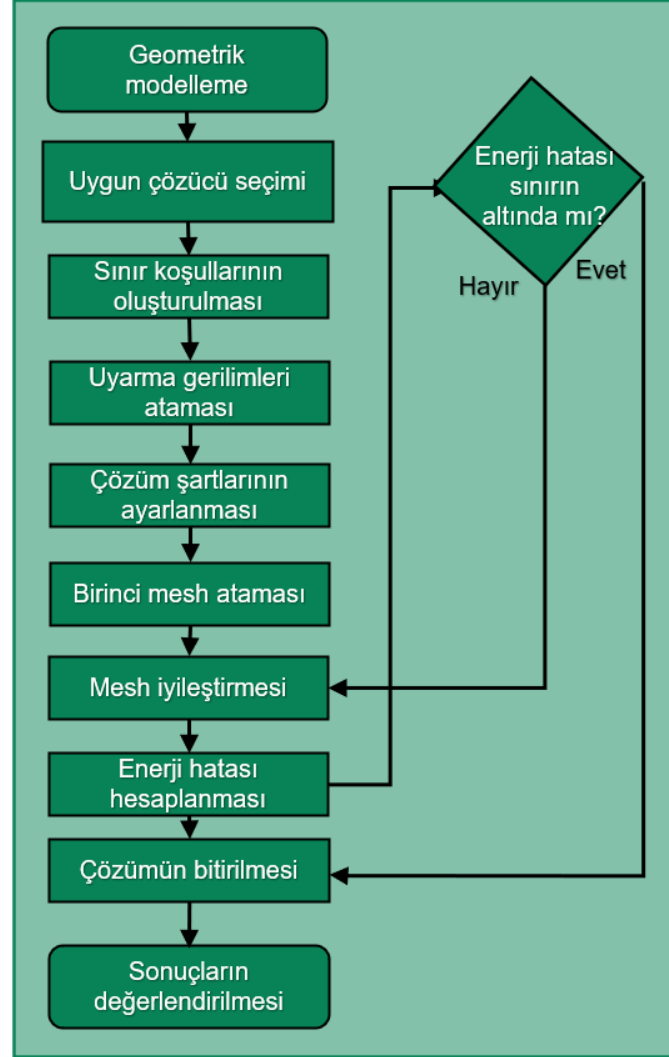
Güç Sistemi Ekipmanlarında Örnek FEM Analizleri

- Busbar: Akım yoğunluğu, indüktans, kayıp...
- İzolatör ve buşingler: Elektrik alan dağılımı...
- Ekipmanlar etrafına oluşan manyetik ve elektrik alan dağılımları



Sonlu Elemanlar Yöntemi

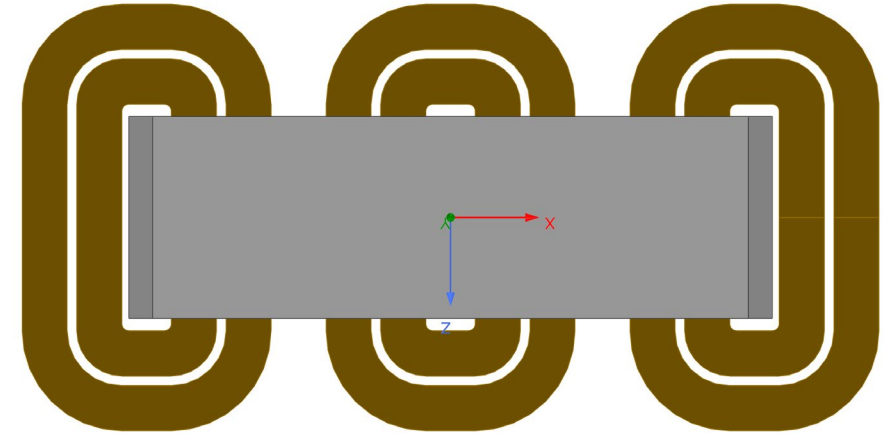
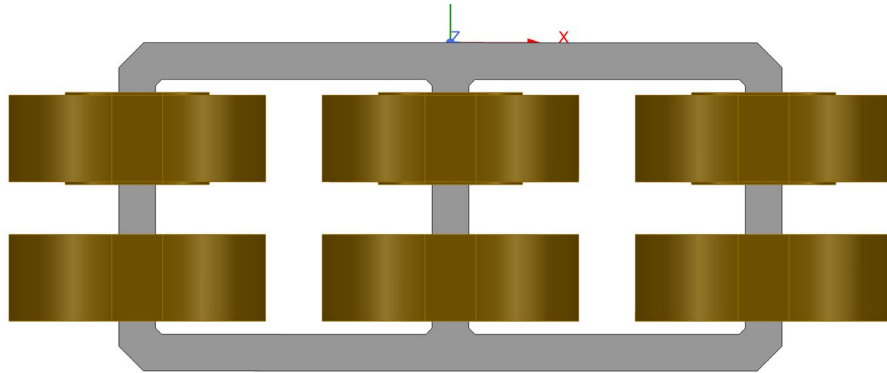
- Kısa sürede ve yüksek doğrulukta çözüm
- Üretimden önce doğrulama
- Performansın arttırılması
- Maliyetlerin azaltılması
- Alternatif malzemelerin değerlendirilmesi
- Saha testi mümkün olmayan durumların analizi
- Kök neden analizleri
- Parametrik tasarımlar ile dizaynın hızlandırılması



Transformatör Özellikleri

Çalışmada incelenen transformatör özellikleri

- 12 darbeli
- 380V/38-38V faz-faz gerilimine sahip
- 7500 VA gücünde
- Dd0y11 bağlantı grubuna sahip
- Oval tip sargılı, sarma nüveli



Sonlu Elemanlar Modeli

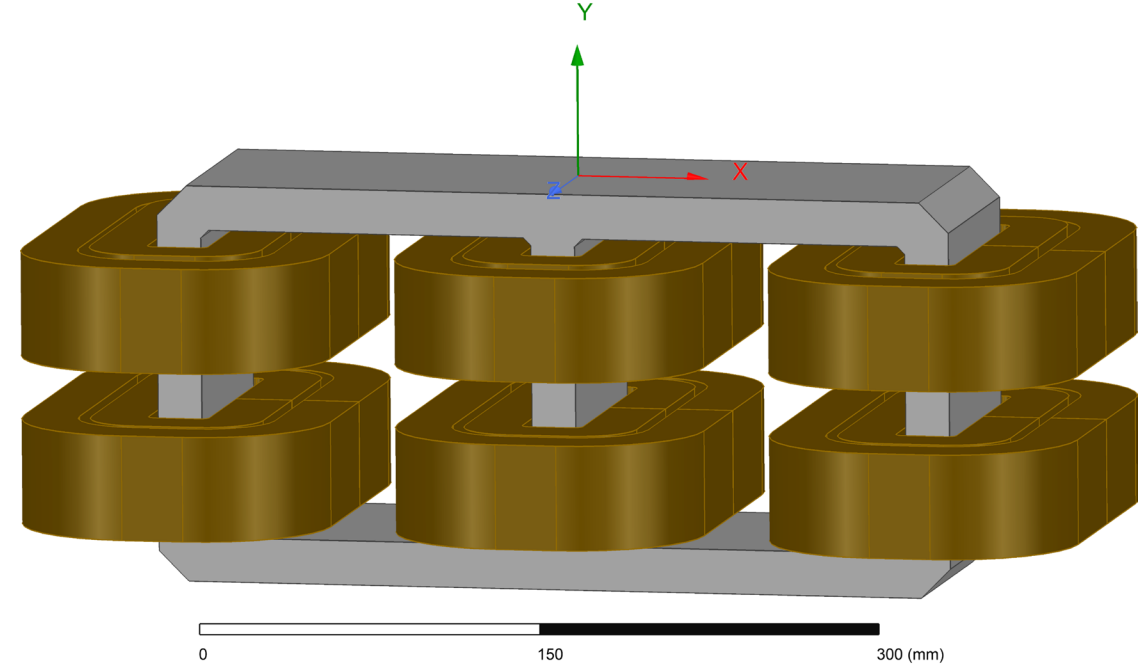
Sonlu elemanlar yöntemi ile sistemde oluşan enerji miktarı hesaplandıktan sonra, kaçak reaktans aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilmektedir.

$$L = \frac{2W_m}{I^2} = \frac{1}{I^2} \int B \cdot H \, dv = \frac{1}{I^2} \int A \cdot J \, dv$$

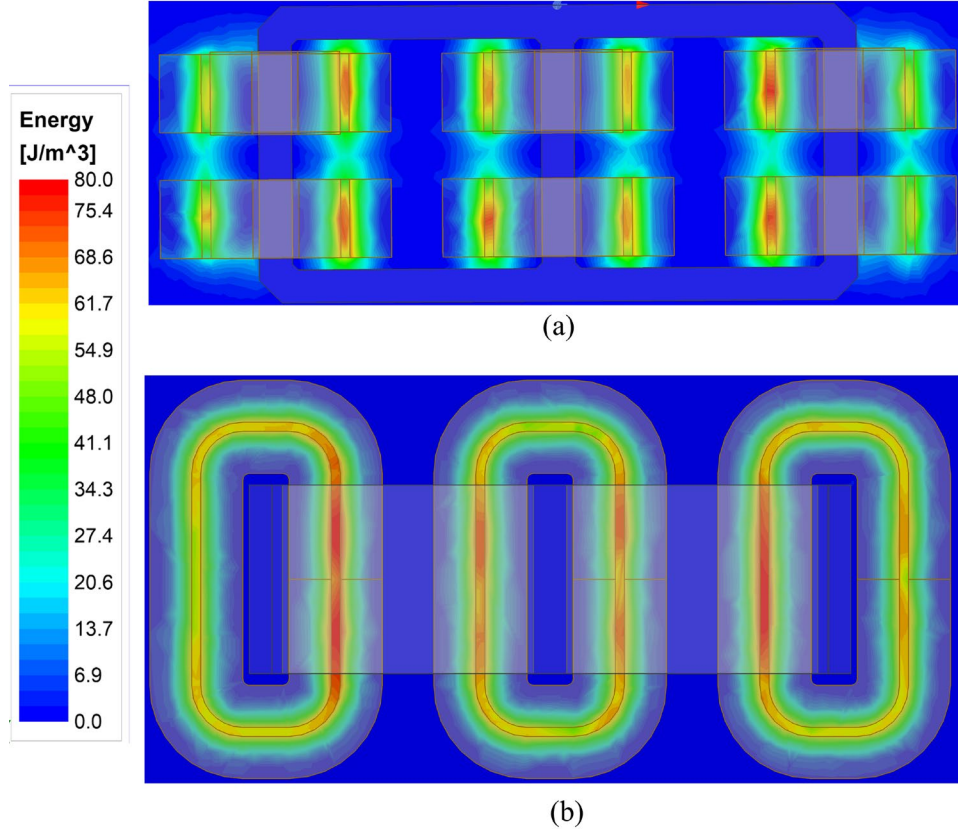
$$X_L = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 2W_m}{I^2}$$

$$Z_B = \frac{V_{\text{phase}}}{I_{\text{phase}}}$$

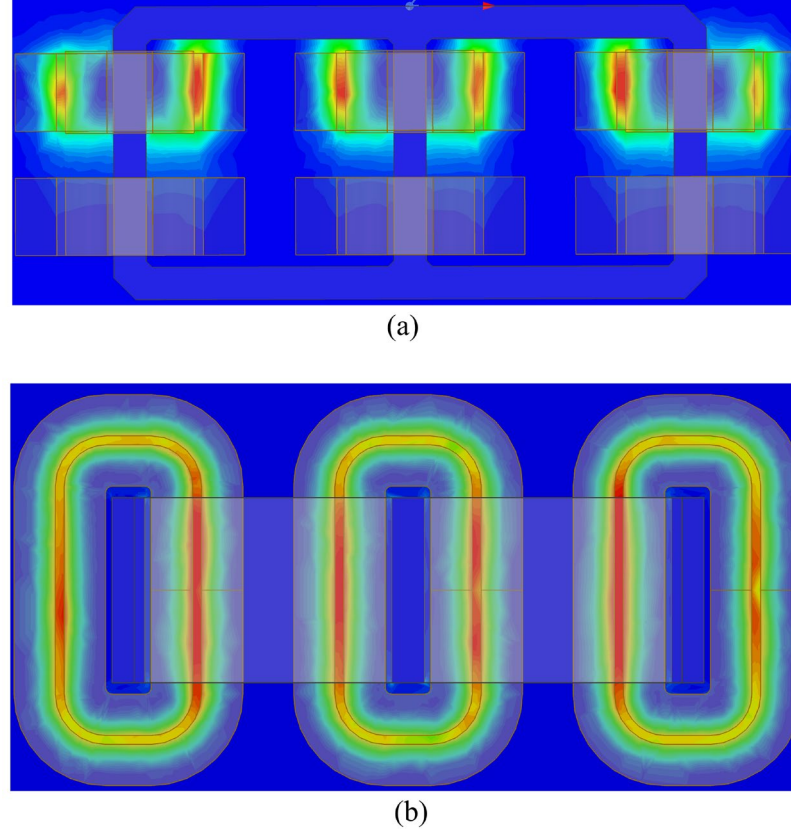
$$\%U_X = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 2W_m \cdot 100}{I^2 \cdot Z_B}$$



Analiz Çalışmaları



Primer sargısından enerji verilip
sekonder üçgen ve yıldız sargının
aynı anda kısa devre edilmesi



Primer sargısından enerji
verilip sekonder üçgen
sargının kısa devre edilmesi

%Ux @3750VA	YG	AG Üçgen	AG Yıldız
YG		8.86	9.05
AG Üçgen	8.86		14.57
AG Yıldız	9.05	14.57	

Test Çalışmaları ve Sonuçlar

Bağıl kaçak reaktans değeri;

$$\%U_x = \sqrt{\left(\frac{100 * (V_m) * (I_n)}{(V_n) * (I_m)}\right)^2 - \left(\frac{100 * (P_m) * \frac{(I_n)^2}{(I_m)^2}}{(S)}\right)^2}$$

V_m ölçülen uyarma gerilimi (V)

V_n , nominal gerilim (V)

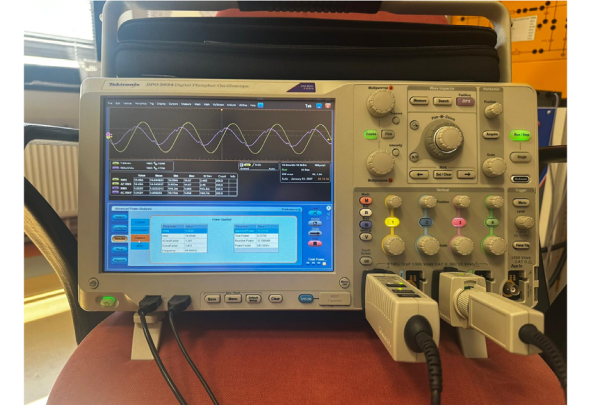
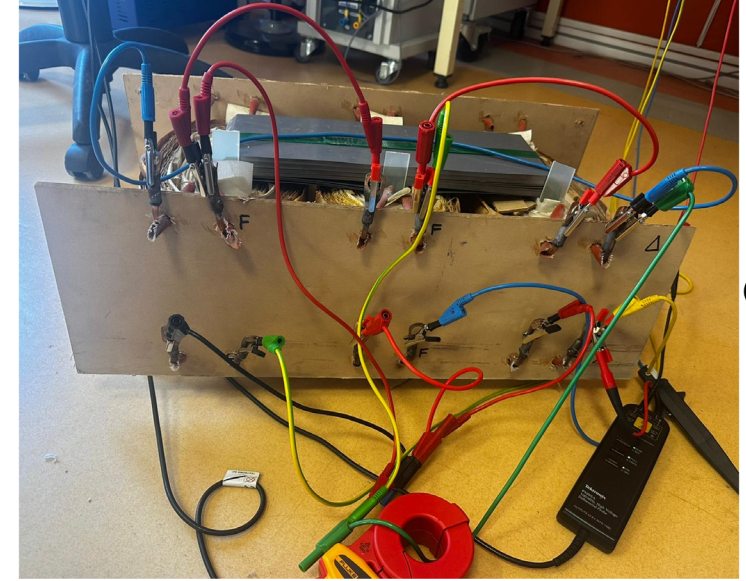
I_n nominal akım (A)

I_m ölçülen akım (A)

P_m ölçülen kayıp (W)

S baz güç (VA)

Besleme sargısı	Kısa devre edilen sargı	Analiz (%U _x)	Test (%U _x)	Fark (%)
YG	AG Üçgen	8.86	9.65	8.19
YG	AG Yıldız	9.05	9.51	4.84
YG	AG Üçgen +AG Yıldız	10.63	11.58	8.20
AG Üçgen	AG Yıldız	14.57	15.91	8.42



TEŞEKKÜRLER

5-6 EKİM 2025



Bu çalışma TÜBİTAK 1001
programı kapsamında 124E630
numaralı proje ile desteklenmiştir.

Elektrik Yük. Müh. Yunus Berat Demirel

Genetek Güç Enerji Ltd., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli,
yunusberat.demirel@genetek.com.tr