

MANYETİK KONTROLLÜ ŞÖNT REAKTÖRÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

İsmet KAYMAZ

Astor Enerji

ismet.kaymaz@astoras.com.tr

Mehmet BAYRAK

Sakarya Üniversitesi

bayrak@sakarya.edu.tr

Semih TURSUN

Astor Enerji

semih.tursun@astoras.com.tr

Özet— Teknolojide meydana gelen gelişmeler ve bu teknolojik ürünlere artan talep nedeniyle enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Enerji ihtiyacındaki bu artış, enerji üretim, iletim ve dağıtım şebekeleri üzerinde olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Oluşan ilave enerji ihtiyacını karşılamak için üretimin artmasından ziyade, şebekelerin doğru bir şekilde koordine edilmesi ve planlanması gerekmektedir. Bu planlamanın başında artan hat kayıpları ve bunların azaltılması gelmektedir.

Elektrik güç sistemlerinde yükün azalmasıyla kapasitif akım artmaktadır. Artan bu kapasitif akım reaktif güç üretimine neden olmakta ve bunun sonucunda hattın akımı artmakta, doğal olarak hat kayıpları da artmaktadır. Oluşan bu reaktif gücün tüketilmesi ve akımın mutlak büyüklüğünün azaltılması gerekmektedir. Bunun için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Ancak, manyetik kontrollü reaktör ayarlanabilir kapasitesiyle reaktif güç dengesini gerçekleştirebilecek en uygun çözümlerden biridir.

Manyetik kontrollü şönt reaktörler son yıllarda dünya üzerinde yaygın olarak kullanılmaya başlandığı gibi, Türkiye’de de yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada, tasarımı yapılan 2MVA’r gücünde Manyetik Kontrollü Reaktörün bir fazlı eşdeğer devresi oluşturularak Ansys-Maxwell programında elektromanyetik analizlerle reaktörün çektiği akım, nüvesinde oluşan kayıplar ve endüksiyon hesaplamaları yapılmıştır. İncelemesi yapılan ürünün üretim aşamasına geçilmiştir, sonrasında test ve analiz verileri karşılaştırılacaktır.

Anahtar Kelimeler — Manyetik Kontrollü Reaktör, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ayarlı Endüktans .

1. GİRİŞ

Teknolojik ürünlere talebin artmasıyla son yıllarda elektrik güç sistemlerinde kirlilik artmıştır. Bu kirlilik akım ve gerilim dalga şekillerinde bozulmalara neden olmaktadır. Gerilimde ve akımdaki bozulma cihaz ömrü ve kullanımı üzerine doğrudan etki edecektir. Bu nedenle, akım ve gerilimde meydana gelen bozulmalar son kullanıcı

için ciddi önem arz etmektedir. Bu tür etkileri oradan kaldırmak veya azaltmak için reaktörler kullanılmaktadır.

Manyetik kontrollü şönt reaktörler (MCSR, Magnetically Controlled Shunt Reactor) aşırı gerilim ve reaktif güç kompanzasyonu için uygun bir güç sistemi elemanıdır. Güç sisteminin iletim kayıpları üzerinde ciddi rol oynamakta olup, iletim hattında oluşan kapasitif etkileri yok etmek için ayarlanabilir kapasitesiyle önemli hale gelmiştir. Manyetik kontrollü reaktörler düşük harmonik seviyesine sahiptir ve üç fazlı sistemlerde üçgen bağlantı sayesinde üçüncü harmoniklerin sargı içerisinde kalması sağlanır. Harmonikler üzerinde tasarımı yapılan reaktörün nüve yapısı da önemlidir. Literatürde nüve şekline göre reaktörün harmonikleri üzerinde çalışmalar yapıldığı görülmüştür [1, 2].

Manyetik kontrollü reaktörler TCR’lere kıyasla maliyeti daha düşüktür ve yüksek gerilim hatlarına direkt olarak bağlanabilirler. Güç sisteminin kalitesi üzerinde daha etkili rol oynarlar. Manyetik kontrollü reaktörlerde kullanılan güç elektroniği elemanlarının boyutları TCR’lere kıyasla daha küçüktür. Bu tipte kontrollü bir reaktör, anahtarlama gerilimini, devrenin kapasitif reaktif gücünü sınırlamada ve ark akımının söndürülmesinde kullanılabilir. Araştırmalarda geçici olarak meydana gelen ark olaylarında kullanılan petersen bobininin, tek fazlı olarak tasarlandığında bir alternatifi olabileceği görülmüştür.

Manyetik kontrollü reaktör, kondansatör gruplarıyla paralel çalışarak, kondansatörlerin anahtarlamasından kaynaklanan dezavantajları ortadan kaldırabilir. Bu şekilde kullanımı sayesinde, tristör kontrollü reaktörün yanı sıra tristör kontrollü seri kondansatöre, statik VAR

kompanzator ve statik senkron kompanzator ile rekabet etmektedir.

Manyetik kontrollü şönt reaktörde harmoniklerin optimizasyonu üzerinde varyasyonel yöntemi ve gauss legendre integrali kullanılarak, demir çekirdeğin şekillendirilmesiyle çalışmalar yapılmıştır.

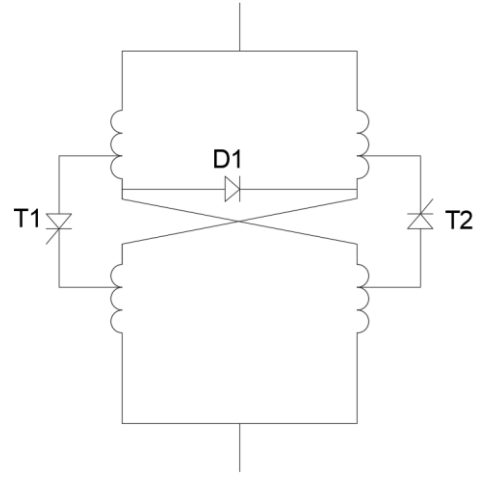
Kontrollü reaktör nüvesi için akının kuvvetlendirileceği yön önemlidir ve bu yöne göre iki çeşit kontrollü reaktör bulunmaktadır. Yapılan çalışmada reaktör nüvesindeki DC akı yarım periyot AC akı ile aynı yönlü iken diğer yarım periyotta ters yönlüdür.

Nüve tasarımı kayıplar ve endüktans değeri için önem arz etmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda bacak yapısının tek aşamalı, çok aşamalı ve dağıtılmış şekilde yapıldığı görülmüştür. En yüksek endüktans değeri çok aşamalı yapıda oluşturulmasına karşılık en az demir kaybının ise dağıtılmış yapıda, kayıp ve endüktans değerleri birlikte değerlendirilince, dağıtılmış yapının kullanılmasının diğer yapılara kıyasla daha avantajlı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada Manyetik Kontrollü Reaktörün çalışma yapısı açıklanacak ve Ansys-Maxwell programı kullanılarak elektromanyetik analizleri (FEM) gerçekleştirilecektir.

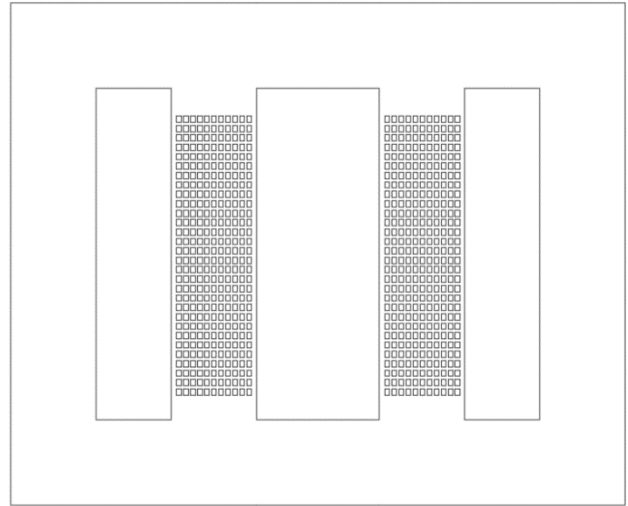
2. MANYETİK KONTROLLÜ REAKTÖR

Elektrik güç sistemlerinde üç fazlı Manyetik Kontrollü Reaktörler üç adet tek fazlı reaktörden oluşmaktadır. Reaktörün basit bağlantı şekli Şekil 1’de gösterilmiştir. Reaktörün nüvesi iki simetrik parçadan oluşan klasik transformatöre benzemektedir. Bacaklarda hatta bağlanan hat sargıları ve kontrol sargıları mevcut olup, bu sargılar da nüvede olduğu gibi simetrik bir yapıya sahiptir. Çalışma esnasında hem kontrol hem de hat sargıları devrededir. Dağıtım sistemlerde kullanılan Manyetik Kontrollü Reaktörde kontrol sargısı ve hat sargısı seri bağlıdır.

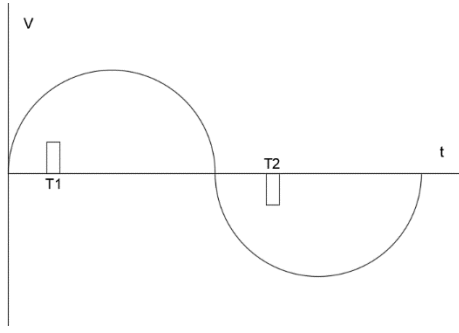


Şekil 1. MCSR tek fazlı eşdeğer modeli

Manyetik devrede hat sargıları AC endüksiyon kaynağı olarak görev yapar ve bu sargıların tasarımı hat gerilim seviyesine bağlı olmaktadır. Sargıda bulunan DC sargılar doymanın gerçekleşmesini sağlamakta olup, sargıların sarım sayısı reaktörün cevap hızı ve kapasitesinde önemli rol oynamaktadır. Tasarım aşamasında DC sarım sayısı istenen ürün özellikleri ve kullanılacak güç elektroniği devreleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Şekil 2’de reaktörün basit bir fazlı eşdeğer modeli gösterilmiştir.



Şekil 2. MCSR nüve yapısı



Şekil 3. Tristör tetikleme açısı

MCSR kontrolü için tristör tetikleme açıları Şekil 3'de görülmektedir. Yarı periyotta bir tristör çalışırken, diğer yarı periyotta diğer tristör çalışmaktadır. Bu tristörlere paralel olarak ilk yarı periyotta bir nüve doyuma giderken, diğer periyotta da diğer nüve doyuma gitmektedir. Tristörlerde herhangi bir tetikleme mevcut değilken nüvede sadece hat geriliminden kaynaklanan AC endüklenme oluşmaktadır. Tristörlerin tetikleme açıları 180°'den 90°'ye doğru gittikçe DC gerilim bileşeninin değeri artmaktadır. Bunun sonucunda, endüktans değeri azalmakta ve reaktörün gücü nominal değerine yaklaşmaktadır. Bu artış hem ayar sargısının geriliminin sınır değerine hem de reaktörün termal dayanım sınırına kadar devam etmektedir. MCSR'ün aşırı yüklenmesi, tasarıma bağlı olarak değişmekle birlikte hedeflenen güç değerinin %20 üzerine kadar olabilmektedir.

Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörün nüve bacaklarında oluşan manyetik akı şiddeti aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [3].

$$H_L(t) = H_{DC} + H_m * \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$H_R(t) = -H_{DC} + H_m * \sin(\omega t) \quad (2)$$

Yukarıdaki bağıntılardan da görüldüğü gibi, bir bacak doyumda iken diğer bacak lineer bölgede çalışmaktadır. DC akı tristörden akan dc akım nedeniyle oluşmaktadır. AC manyetik alan şiddeti sinüs formunda bulunmaktadır. AC bileşen sinüs formunda olsa bile çekirdekte endüklenen akı DC bileşenden dolayı aynı şekilde sinüs formunda değildir. Aşağıda sol ve sağ bacakta endüklenen akı yoğunlukları için bağıntılar verilmiştir.

$$B_L(t) = B_0 + B_1 * \sin(\omega t - Q_1) + B_2 * \sin(2\omega t - Q_2) + B_3 * \sin(3\omega t - Q_3) + \dots + B_n * \sin(n\omega t - Q_n) \quad (3)$$

Nüve bacakları arasında yarım dalga simetrisi sağlanmaktadır ve B_R ifadesi şu şekildedir [3]:

$$B_R(t) = -B_0 + B_1 * \sin(\omega t - Q_1) - B_2 * \sin(2\omega t - Q_2) + B_3 * \sin(3\omega t - Q_3) + \dots + B_n * \sin(n\omega t - Q_n) \quad (4)$$

H_L : Sol bacaktaki manyetik alan şiddeti

H_R : Sağ bacaktaki manyetik alan şiddeti

H_{DC} : Bacakta oluşan DC manyetik alan şiddeti

H_m : Bacaktaki AC manyetik alan şiddetinin maksimum değeri

B_L : Sol bacaktaki manyetik akı yoğunluğu

B_R : Sağ bacaktaki manyetik akı yoğunluğu

B_0 : Bacaktaki DC manyetik akı yoğunluğu

B_n : Bacaktaki maksimum manyetik akı yoğunluğu n.harmonik değeri

Q_n : Bacaktaki akı yoğunluğunun faz kayması

Yukarıdaki bağıntıda verilen harmonikli endüksiyon bileşenleri MCSR akımına yansiyacaktır. Bunun sonucunda, MCSR harmonikli akım çekecektir ve gerilimde bozulma meydana gelecektir. Bu harmonikler nüvede oluşturulan boşlukların koordinasyonu ile aktif filtre gibi yüksek maliyete neden olan ekipmanlar gerektirmeden çözülebilmektedir [4]. MCSR 36 kV sistemlerde üç fazlı kullanılması durumunda üçgen bağlantı yapılır. MCSR'deki 5. ve 7. harmoniklerin önemli ölçüde gerilim bozulmasına neden olduğu gözlenmektedir. Bunun için nüve geometrisi üzerine iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLEME

MCSR'ü doğru biçimde modellemek için Ansoft Maxwell Sonlu Elemanlar simülasyon yazılımı kullanılmaktadır. Sonlu ağ oluşturma mantığına dayanarak çözüm gerçekleştiren bu program elektromanyetik tasarımlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Karmaşık bir tasarım sürecine sahip ürünleri sonlu elemanlar yöntemi kullanarak

çözümlenmek diğer yöntemlere göre daha kolay olmaktadır. Analitik yöntemlerde geometrilerin tam modelini dikkate alıp çözmek zordur ve çok zaman almaktadır. Geometrinin tamamını dikkate almamak bazen sonuçlarda ciddi farklılıklara neden olmaktadır. Bilgisayar sistemlerinde meydana gelen gelişmeler sonucunda, FEM üzerine yönelim daha da artmıştır. Elektrik makinalarının tasarım sürecinde FEM kullanılması sayesinde prototip sayısı da ciddi oranda düşmekte, bu da Ar-Ge maliyetini etkilemektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanan Ansys-Maxwell programı Maxwell denklemlerini parça parça çözüp daha sonra birleştirmektedir. Ansys-Maxwell programı manyetik alan şiddetini (H), manyetik akı yoğunluğunu (B), akım yoğunluğunu (J), elektrik akı yoğunluğunu (D), elektrik alan şiddetini (E) hesaplamak için kullanılabilir.

Analizi yapılan modelin üzerinde biriken enerjiyi hesaplamak için eşitlik 5 kullanılır. Eşitlik 5'deki integral ifadesi hacimseldir [5].

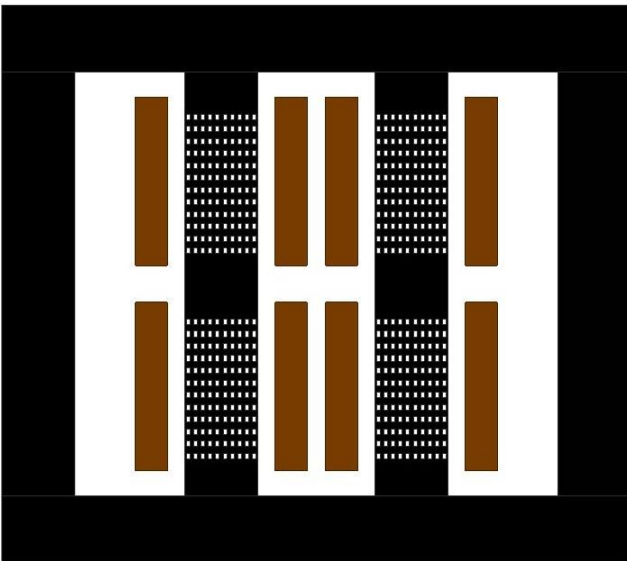
$$W_m = \int_V \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \, dV \quad (5)$$

Elde edilen enerji endüktans hesabında kullanılır ve ilgili bağıntı aşağıda gösterilmiştir.

$$L = 2 \frac{W_m}{I^2} \quad (6)$$

Burada, W_m enerjiyi, I reaktör akımını, L reaktör endüktansını göstermektedir.

Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörün nüve yapısı Şekil 2'de verilmişti. Sargıları içeren model ise Şekil 4'de görülmektedir.



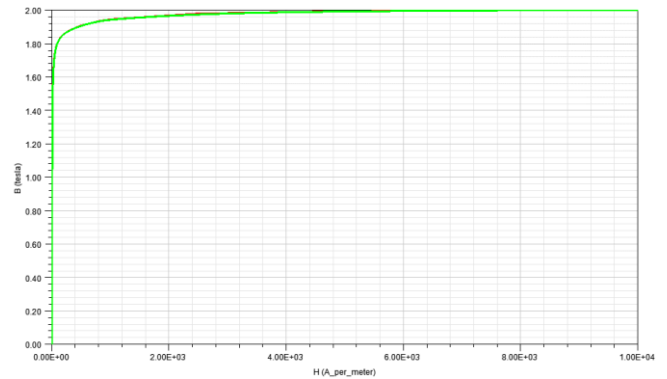
Şekil 4. MCSR sonlu elemanlar modeli

Yukarıdaki şekilde verilen modelde reaktör hem AC hem de DC sargılardan oluşur. DC sargılar reaktörü doyuma götürerek endüktansı değiştirmek amacıyla kullanılır ve AC sargı içinde hem DC hem AC sargı görevini yapar [6-8]. Tasarımı yapılan Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörün parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. MCSR etiket değerleri

Gücü (kVAr)	2000
Gerilimi (kV)	31,5
Endüktans aralığı (H)	4,737-94,76
Frekansı (Hz)	50

Şekil 4'te siyah renk ile gösterilen kısımlar demir çekirdeği, kahverengi olarak gösterilen kısımlar ise sargıları temsil etmektedir. Sargılar demir çekirdek üzerine sarılmış olup, model tek fazı göstermektedir. MCSR modellendikten sonra her bir parçanın özelliklerinin ayarlanması gerekmektedir. Bu modelde sargı malzemesi olarak alüminyum malzeme kullanılmış, demir çekirdek ise silisyumlu sac olarak atanmıştır. Nüvede gerekli akı yoğunluğunu sağlayarak enerjiyi toplamak için hava aralıkları kullanılmıştır ve bu aralıklar modele eklenmiştir. Demir çekirdeğin B-H karakteristiği şekil 5'te verilmiştir.

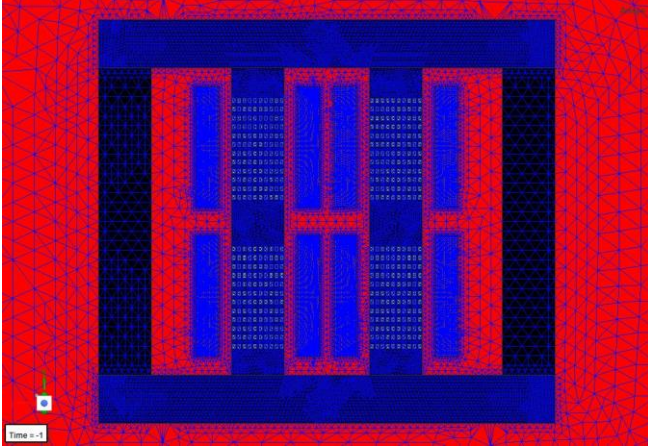


Şekil 5. B-H karakteristik eğrisi

Modelde kullanılan sınır koşulları balon sınırları veya sıfır vektör potansiyeli biçiminde uygulanabilir. Çalışmamızda sıfır vektör potansiyel sınır koşulu uygulanmıştır. Modelde oluşturulan ağ yapısı Şekil 6'da verilmiştir.

Ağ oluşturma işlemi sonucunda model 83718 parçaya bölünmüştür. Model daha fazla parçaya

bölünebilirdi, fakat bu durumda parça sayısının artması çözüm süresini önemli derecede arttırmaktadır. Çözüm doğruluğu ve parça sayısı en uygun şekilde ayarlanmıştır. Hava boşlukları küçük ve çok parçalı olup, ağ oluşturma sırasında ilk ağ yani kaba ağ ayarları dikkatli bir şekilde yapılmış ve modelin köşeli yapısı dikkate alınmıştır. İki boyutlu model kullanılması sayesinde simülasyon süresi üç boyutlu modele göre önemli oranda kısalmıştır.

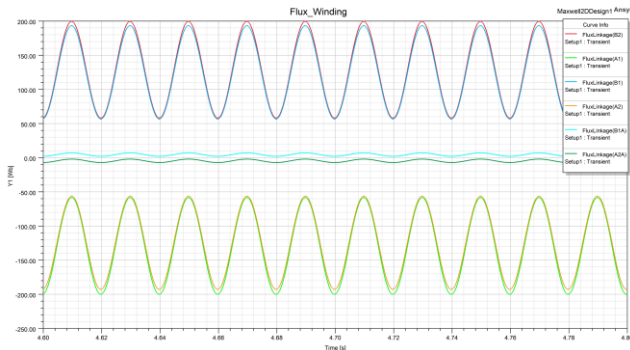


Şekil 6. Modeldeki ağ yapısı

Manyetik Kontrollü Reaktör sargılarına, harici devre uyarımı için Simplorer yazılımı kullanılmıştır. Sol ve sağ bacadaki sargılar uygulanan gerilime paralel olarak bağlanmıştır. Reaktörün çalışması için istenilen DC gerilim değeri tristör uyarma devresiyle oluşturulmuştur.

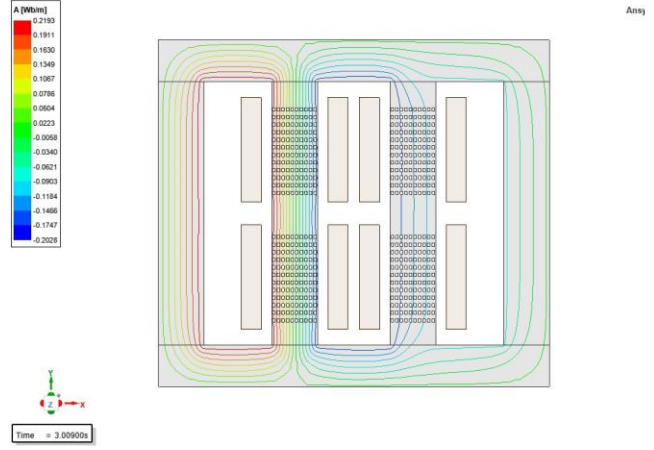
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

MCSR'un DC sargılarında herhangi bir uyarım bulunmadığında en düşük kapasitede yani doğrusal bölgede çalışmaktadır. Tristörlerin tetiklenmesiyle DC uyarım oluşur ve reaktörün nüvesindeki endüksiyon doyum bölgesine doğru ilerler. Reaktör dengeye geldiğinde, belirli bir akı değerinde AC kaynaktan dolayı salınım yapar. Bu salınım Şekil 7'de gösterilmiştir.

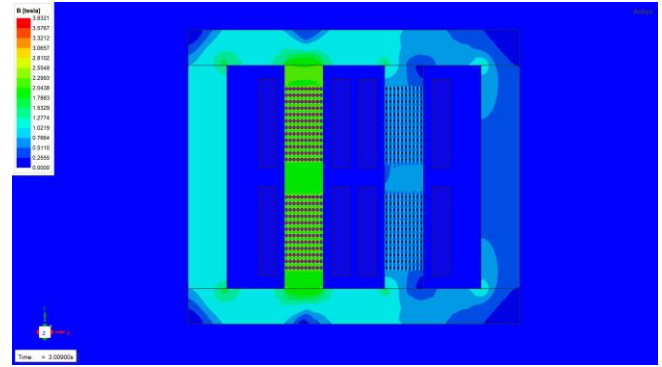


Şekil 7. Sargılardaki akı salınımı

Nüvede ve hava aralıklarında biriken enerji sonucunda reaktör endüktansı düşer ve akım çekmeye başlar. Şekil 8'de nüvede ilk yarı periyotta oluşan maksimum akı dağılımı verilmiştir.

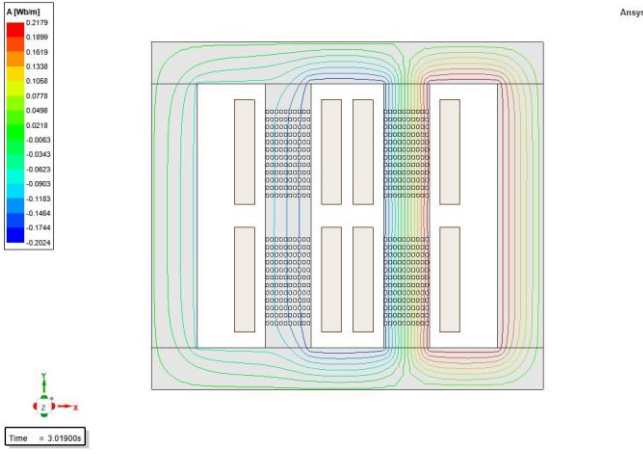


Şekil 8. İlk yarı periyottaki maksimum akı dağılımı

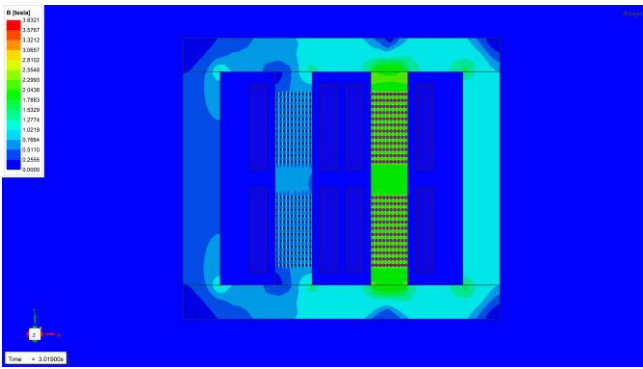


Şekil 9. İlk yarı periyottaki maksimum akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 8 ve Şekil 9'dan da görüldüğü gibi, bacalardaki boşluklu yapıdan dolayı bacak aktif kesiti azalmıştır ve bu azalma sonucunda bölgesel doymalar meydana gelmiştir. Tristörler devrede değilken bacalarda sadece AC gerilimden kaynaklı AC akı bulunmaktadır ve bu akı doyum için yeterli seviyede değildir. Şekil 10'da ikinci yarı periyotta nüve bacağına meydana gelen maksimum akı dağılımı, Şekil 11'de de akı yoğunluğunun dağılımı verilmiştir.

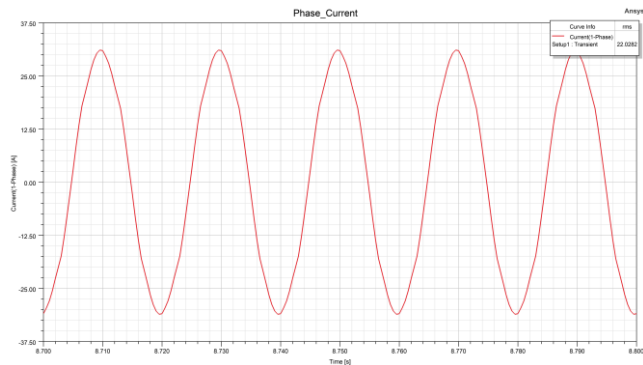


Şekil 10. İkinci yarı periyotta maksimum akı dağılımı



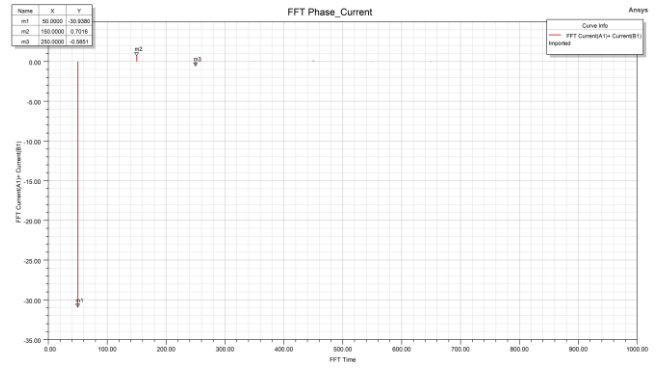
Şekil 11. İkinci yarı periyotta maksimum akı yoğunluğu dağılımı

Şekillerden de anlaşılacağı gibi, bir periyodun yarısında bir bacak diğer yarısında diğer bacak devrededir. Bir bacak bir periyot boyunca aktif olarak çalışmamaktadır. Ancak, reaktörün nominal gücünün üzerindeki güç değerlerinde çalışma bölgeleri değişebilir. Böyle bir çalışma rejimi reaktörün ömrünü kısaltacak ve kayıplarını arttıracaktır. Bu nedenle, reaktörün uzun süre bu şekilde çalışması istenmez.



Şekil 12. Hat sargısı tek faz akımı

Sargı akımı şekil 12’de tek faz olarak gösterilmiştir. Analiz sonucunda bu akımın RMS değeri 22,03 A olarak bulunmuştur. Bu akım değeri tetikleme açısına göre değişmektedir. Dalga şeklinden de görüleceği üzere, akım harmonik bileşenlerini içermektedir. Maxwell programında tek faz modelleme yapıldığı için 3. harmonikler akım içerisinde görülür. Akım dalga şekli için harmonik analizi yapılmıştır ve sonuçlar şekil 13’de verilmiştir.

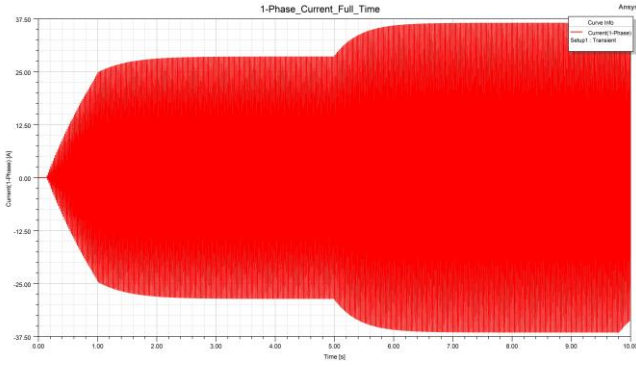


Şekil 13. Hat sargısı tek faz akımı için harmonik analizi

Üçüncü harmonikler ana harmonik bileşenin %2,26’sı olarak hesaplanmış olup, bu akım üç fazlı tasarımlarda reaktör sargıları üçgen bağlı olduğundan ana hatta yansımaz. Üçgen bağlı sargı yapısının çok yüksek gerilim seviyelerinde yapılması ekonomik olmayacaktır. Yüksek gerilim seviyeleri için reaktör yıldız bağlanır ve harmonikler için gerek ek sargılarla gerekse filtrelerle önlem alınabilir. Bu nedenle, tasarım aşamasında harmonik içeriği dikkate alınmalı ve reaktörün soğutma sistemi bu hesaplamalara göre tasarlanmalıdır.

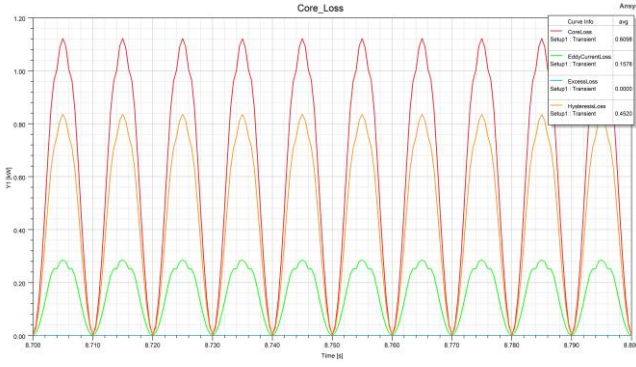
Beşinci harmonik bileşenin değeri ana harmonik bileşenin %1,891’i olarak hesaplanmıştır. Bu değer, sistemin üç fazlı üçgen bağlı olmasından bağımsız olarak hat akımına yansımaz ve gerilimde bozulmalara neden olacaktır.

Yukarıdaki analiz sonuçlarında reaktör 2080 kVAr’lık (faz başına 693,3 kVAr) bir reaktif güle yüklenmiştir. Belirli bir süre sonra reaktörü kontrol eden tristörlerin açısı değiştirilerek nüveye uygulanan DC gerilimin değeri değiştirilmiştir ve güçte değişim sağlanmıştır (Şekil 14).



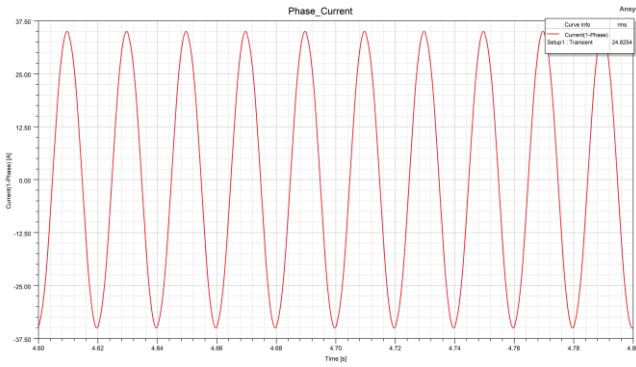
Şekil 14. Hat sargısı tek faz akım değişimi

Şekil 14'de görüldüğü gibi, 5. saniyede tetikleme açısı değiştirilmiş ve bunun sonucunda reaktörün çektiği akım artarak reaktörün gücü artmıştır. Tetikleme açısı değişimi yaklaşık olarak 1 saniye gibi bir sürede sonuçlanmıştır. 2080 kVAr gücünde nüvede meydana gelen demir kayıpları ise Şekil 15'de verilmiştir.



Şekil 15. Nüve kayıplarının zamanla değişimi

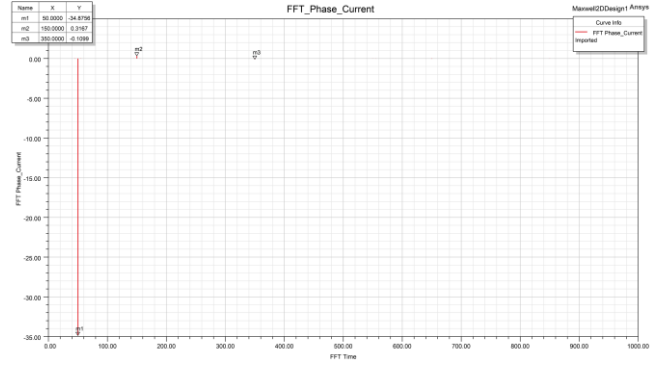
Nüvede 609,8 W'lık (1 faz) bir demir kaybı meydana gelmiş olup, bu kayıpların %25'i eddy kayıplarıdır. Kalan %75'lik kısım ise histeresiz kayıplarından oluşmaktadır.



Şekil 16. Hat sargısı tek faz akımı

Şekil 16'de gücün değiştirilmesi sonucunda reaktör akımının 24,82 A değerine geldiği görülmektedir.

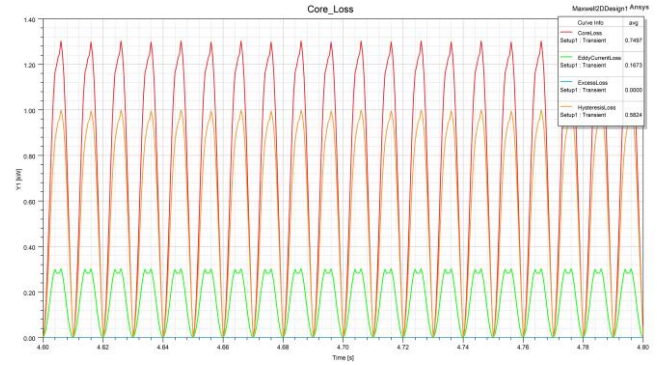
Bu akım değeri nominal akım değerinin yaklaşık %17 kadar üzerindedir. Akımdaki harmonik bileşenleri Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. Hat sargısı tek faz akımı için harmonik analiz

Yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi, akım harmonikleri azalmıştır. Üçüncü harmonik değeri ana harmonik bileşenin %0,9'u olarak, beşinci harmonik değeri ise ana harmonik bileşenin %0,315'i olarak hesaplanmıştır.

Reaktör nüvesinde endüksiyondan kaynaklı olarak demir kayıpları meydana gelmektedir. Bu kayıplar tasarım aşamasında ciddi önem taşımaktadır. Reaktör %17 daha fazla yüklü durumdayken nüve kayıpları Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 18. Aşırı yüklü durumda nüve kayıpları

Fazla yüklenme durumunda nüvede 750 W'lık (1 faz) kayıp oluşmuştur. Bu kayıpların %22'si eddy kayıplarını, %78'i ise histeresiz kayıplarını oluşturmaktadır. Bu değerler reaktör yüklenme derecesine bağlı olarak değişmekte ve bu değişim doğal olarak reaktör akımının harmonik bileşenlerini doğrudan etkilemektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini ile Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör modellenmiş ve Ansys-Maxwell programı yardımıyla analizleri yapılmıştır. Analizlerde kullanılan model diğer modelleme yöntemlerine göre çözümü daha kolay ve gerçeğe daha yakın bir modeldir. Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörün temel çalışma prensibi ve yapısal özelliklerinden yararlanılarak gerçeğe yakın bir eşdeğer model programa tanımlanmış ve elektromanyetik analizi yapılmıştır. Elektromanyetik analiz sonucunda reaktör nominal güce yakın bir güçte yüklenmiş ve çektiği akım harmonikleri, nüvede meydana gelen akı dağılımı, nüve kayıpları, tristörlerde meydana gelen tetikleme açısı değişimine verdiği tepki incelenmiştir. Ardından reaktör nominal gücün üzerinde yüklenmiş, akım harmoniklerinde ve kayıplarda meydana gelen değişimler gözlenmiştir.

Akım harmoniklerinin reaktörün yüklenmesi ile de ilgili olduğu sonucuna varılmıştır. Reaktör nominal güç değerine yaklaştıkça reaktör akımındaki harmonik bileşenlerinin değerleri azalmıştır. Reaktör nominal güç değerinde çalışırken çektiği akımın minimum harmonik içeriğine sahip olmasına dikkat edilmeli ve tasarım buna göre yapılmalıdır.

Reaktörün sargı bağlantı biçiminin harmonikler üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Tasarımı yapılan MCSR tek fazlı olarak incelendiği için akım dalga şeklinde üçüncü harmonik bileşenleri oluşmuştur. Üç fazlı olarak tasarlandığında ise bu harmoniklerin bağlantı şeklinden dolayı üçgen bağlantı içerisinde kalacağı bilinmektedir. Bu nedenle, tasarım aşamasında bu durum dikkate alınmalı sargı tasarımı ile nüve tasarımı buna göre yapılmalıdır.

Reaktörün nüvesinde meydana gelen kayıplar eddy ve histeresiz kayıplarıdır. Nüvede oluşan akı değeri arttıkça eddy kayıplarının ve toplam nüve kayıplarının daha fazla olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Zhang, X., Lv, B., Qu, T., Zhang, H., Ma, Y., & Ma, X. (2019). The compensation method for temperature rise test of 750kV magnetic controllable reactor. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 118, p. 02062). EDP Sciences.
- [2] Tong, L., Hu, C., Li, X., Fan, X., & He, L. (2019, June). FEM analysis of iron core losses in magnetically controlled shunt reactor with distributed magnetic valves. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 486, No. 1, p. 012122). IOP Publishing.
- [3] ZHENG, T., & YU, K. (2018, November). Research on the stimulation modeling of magnetically controlled shunt reactor. In *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)* (pp. 3940-3947). IEEE.
- [4] Yang, M., Chen, B., Tian, C., Wu, F., & Guo, Z. (2023). Minimizing the harmonics generated in magnetically controllable reactors by shaping the iron core using the variational method and Gauss-Legendre integral. *Energy Reports*, 9, 2618-2628.
- [5] Yan-ping, L., Fang, Z., Hai-ting, Z., & Zhen, A. (2010, June). Leakage inductance calculation and simulation research of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor. In *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* (pp. 4025-4028). IEEE.
- [6] Oleksyuk, B. V., Tulsy, V. N., & Palis, S. (2017). Magnetically controlled shunt reactors as sources of current and voltage harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(4), 1818-1824.
- [7] Xu, X. (2014). Research on magnetic valve structure optimization of magnetic controlled reactor. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 8(1).
- [8] Bogdanovics, R., & Makarova, M. (2014, November). Dual model of single-winding magnetically Controlled Shunt Reactor. In *2014 IEEE 2nd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)* (pp. 1-3). IEEE.