



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 22.12.2023  
Kabul Tarihi : 20.02.2024

Received Date : 22.12.2023  
Accepted Date : 20.02.2024

### MANYETİK KONTROLLÜ ŞÖNT REAKTÖR FEM ANALİZİ VE UYGULAMASI

### MAGNETIC CONTROLLED SHUNT REACTOR FEM ANALYSIS AND APPLICATION

İsmet KAYMAZ<sup>1\*</sup> (ORCID: 0009-0005-3782-7196)  
Mehmet BAYRAK<sup>2\*</sup> (ORCID:0000-0001-5225-0640)  
Semih TURSUN<sup>3\*</sup> (ORCID: 0009-0008-0818-7638)

<sup>1,2</sup> Sakarya Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye  
<sup>1,3</sup> Astor Enerji, Ankara, Türkiye

<sup>1</sup>\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İsmet KAYMAZ, ismet.kaymaz1@ogr.sakarya / ismet.kaymaz@astoras.com.tr

#### ÖZET

Enerji ihtiyacı insanlığın teknolojik ürünleri kullanması ve gelişimine yönelmesiyle günümüze kadar artarak devam etmiştir. Bu enerji talebindeki artış hatlardan iletilen güç miktarında da artışa neden olmuştur. Bu güç artışı iletim ve dağıtım hatlarına olumsuz bir etki olarak yansımıştır. Bu artışı telafi etmek için üretim artmakla kalmayıp aynı zamanda iletim hatlarının da bu enerji akışı için kordine edilmesi gerekmektedir. İletim hatlarında düzenleme yapılmadığı takdirde artan enerji ihtiyacına karşılık iletilen enerji yeterli gelmeyecek, hatlarda gerilim düşümü ve kayıplar ciddi derecede artacaktır. İletim hatlarından aktarılan güç her zaman sabit değildir, belirli zamanlarda düşüş veya artış göstermektedir. Bu düşüş veya artış iletim sistemi endüktansında ve kapasitesinde farklılıklar meydana getirir. Düşük yük durumlarında kapasitif etkiler meydana gelmektedir ve bunun sonucunda hattın akan kapasitif akım değerinde artış olmaktadır. Bu artış reaktif güç üretimini de beraberinde getirmektedir. Üretilen reaktif gücün tüketilmesi ve hattın iletilen akımın büyüklüğünün azaltılması gerekmektedir. Bu sorunun çözümü için birden fazla yöntem mevcut olmasına rağmen ayarlanabilir reaktif güç kapasitesiyle manyetik kontrollü reaktör en uygun çözümlerden biridir. Manyetik kontrollü şönt reaktörler son yıllarda yaygınlaşan, güç elektroniği ve transformatör sektörünün birleşmesiyle ortaya çıkan efektif bir üründür. Yapılan bu çalışmada, teorik olarak tasarlanan manyetik kontrollü şönt reaktörün elektromanyetik analizleri yapılmış, ürün üretilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Manyetik kontrollü reaktör, sonlu elemanlar yöntemi, manyetik alan, reaktif güç, ayarlı endüktans.

#### ABSTRACT

Throughout history, the human race has made significant strides in technological advancements, leading to an increase in energy demand. As a result, there has been an escalation of power transmitted through transmission and distribution lines, which has negatively impacted these systems. To address this issue, it is essential to coordinate the transmission lines to handle this energy flow as the growing energy demand will exceed the capacity of the transmitted energy if the transmission lines are not adjusted. The power transmitted through these lines is not always constant; it can fluctuate, causing variations in the transmission system's inductance and capacitance. Capacitive effects can occur during low-load conditions, resulting in an increase in capacitive current flowing through the lines, leading to the production of reactive power. To address this issue, it is crucial to consume the generated reactive power and reduce the magnitude of current transmitted through the lines. There are various methods available to address this problem, but one of the most effective solutions is to use magnetically controlled shunt reactors to adjust the reactive power capacity. This product has become increasingly popular in recent years, resulting from the fusion of power electronics and the transformer sector. In this study, electromagnetic analyses of the theoretically designed magnetic-controlled shunt reactor were conducted. A product was manufactured, and the results were discussed.

**Keywords:** Magnetically controlled reactor, finite element method, magnetic field, reactive power, tuned inductor.

ToCite: KAYMAZ, İ., & BAYRAK, M., & TURSUN, S., (2024). MANYETİK KONTROLLÜ ŞÖNT REAKTÖR FEM ANALİZİ VE UYGULAMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 554-566.

## GİRİŞ

Teknolojide meydana gelen gelişmeler sonucunda teknolojik ürünlerin gelişimi ve kullanımı artmıştır. Bu artış güç sistemlerinde kirliliği de beraberinde getirmiştir. Kirlilik basit bir şekilde özetlenecek olursa akım ve gerilim dalga şeklinde meydana gelen bozulmaları ifade eder. Kirlilik teknolojik cihazların ömrü üzerinde de ciddi etkiye sahiptir. Etkiyi hafifletmek için reaktörler kullanılmaktadır.

Manyetik kontrollü şönt reaktörler (MCSR, Magnetically Controlled Shunt Reactor) sistem ihtiyacına göre sürekli ayarlanabildiği için diğer reaktif güç cihazlarını donatmaya gerek kalmadan reaktif güç ve gerilim kontrolünü sağlarlar. İletim hattının stabilizasyonu için yük atma ve alma anında istenilen reaktif güç değerine hızla uyum sağlayabilir. MCSR kapasitif reaktif gücü dinamik olarak dengeler ve sistem kararlılığı üzerinde etkin rol oynar.

Statik VAR Kompanzator gibi geleneksel reaktif güç kompanzasyon cihazları genellikle hem reaktif güç hem de aşırı gerilimi bastırmaya yeterli değildirler. MCSR bu sorunu ortadan kaldırır, reaktif güç sorununun yanında aynı anda aşırı gerilim sorununu da çözer.

MCSR'ler düşük harmonik seviyesiyle ön plana çıkmaktadır. 36 kV gerilim seviyesine kadar yapılan MCSR tasarımında sargı yapısı olarak üçgen bağlantı tercih edilmektedir. Bu tercihin sonucunda üçüncü harmonikler sargı içerisinde kalır. Harmonikler üzerinde sargı bağlantı şeklinin yanı sıra nüve yapısı da etki eder. Nüve yapısındaki hava aralıklarının kordinasyonu ile istenilen harmonik değeri üzerinde optimizasyon yapılabilir. Literatür araştırmalarının sonucunda nüve şekillerine göre reaktör harmonikleri üzerinde çalışmalar yapıldığı da görülmüştür (Yang vd. , 2023 ; Chen vd., 2011) .

Manyetik kontrollü reaktörler tristör kontrollü reaktörlere kıyasla maliyet açısından daha ucuz olmasının yanında yüksek gerilim hatlarına da arada transformatör olmadan doğrudan bağlanabilmektedirler. MCSR'lerde kullanılan tristör boyutları TCR'lere kıyasla daha küçük ve buna bağlı olarak daha ucuzdur (Karymov & Ebadian ,2007) .

Nüve tasarımı bu ürün için ciddi önem arz eder. Tasarım yapısına göre reaktörün endüktansı ve güç kayıpları değişmektedir. Araştırmalarda, bacak yapısının tek aşamalı, çok aşamalı ve dağıtılmış şekilde boşluklar yapılarak oluşturulduğu görülmektedir. Güç kaybı ve endüktans dengesi tarafından bakılınca dağıtılmış yapının kullanılmasının diğer yapılara kıyasla daha avantajlı olduğu görülmüştür (Tong vd., 2019).

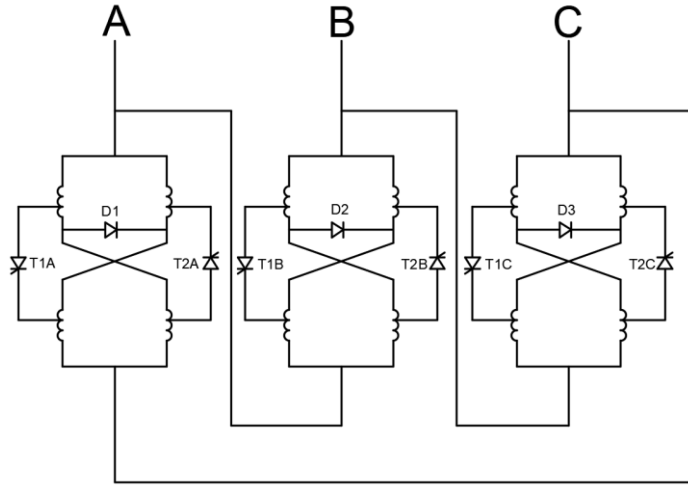
Bu çalışmada, manyetik kontrollü reaktörün çalışma yapısı açıklanacak, elektromanyetik analizleri Ansys-Maxwell programıyla gerçekleştirilecek ve üretimi yapılan reaktörün test verileri yorumlanacaktır.

## MANYETİK KONTROLLÜ REAKTÖR

Modern MCSR'lerin altında yatan çalışma prensibi olan elektrik çeliğin manyetik doyumunun kullanımına ilişkin ilk fikirler 1940'larda ortaya çıkmıştır. İlk yapılan MCSR'lerin teknik ve ekonomik performansı optimal olmaktan uzaktı, maliyeti yüksek, cevap hızı düşük olup, sınırlı kontrol aralığı mevcuttu. Bu olumsuz nedenlerden dolayı bir süre üretimi durmuştur. Zamanla bu sorunların ortadan kalkmasıyla MCSR kullanımı özellikle son yıllarda ciddi bir artış göstermiştir (Xu , 2009).

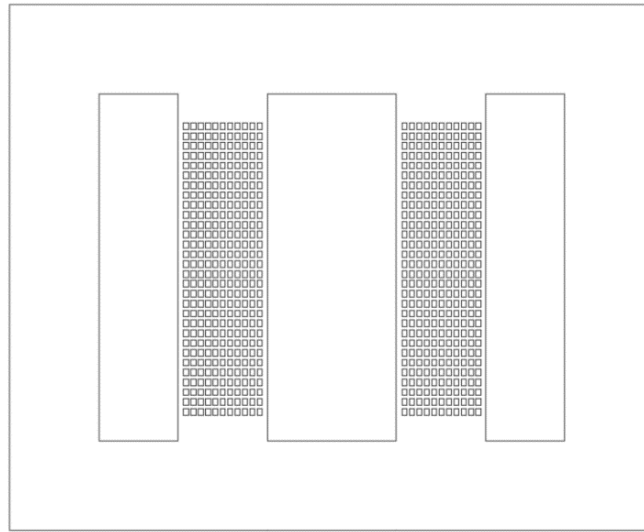
MCSR'lerin yapısı normal transformatör yapısına çok benzerdir ve aktif kısım iki adet üç fazlı transformatörden oluşur. MCSR bacaklarında hat sargısının yanı sıra kontrol sargısı da bulunur. Kontrol sargısı hat sargılarının belirli bir yüzdesini kapsayacak şekilde tasarlanır. Üç fazlı üçgen bağlı MCSR'nin bağlantı şekli Şekil 1'de gösterilmiştir.

MCSR iki simetrik ve paralel bağlı reaktöre benzemektedir. Bu simetri hat sargıları ve kontrol sargıları için de geçerlidir. Çalışma esnasında hem kontrol hem de hat sargıları devrededir. Dağıtım sistemlerde kullanılan Manyetik Kontrollü Reaktörde kontrol sargısı ve hat sargısı seri bağlıdır.

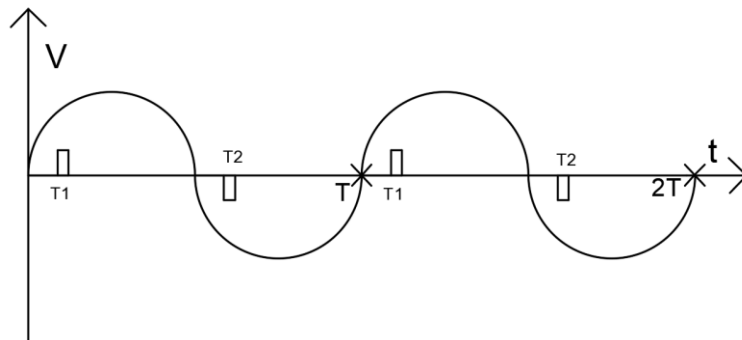


Şekil 1. MCSR Üç Fazlı Eşdeğer Modeli

Manyetik olarak incelendiğinde, hat sargısı AC endüksiyon kaynağı olarak görev yaparken DC sargılar ise nüvenin doyuma gitmesini sağlayan doğru gerilimi oluşturan sargılar olarak görev yapar. Şekil 1'den görüleceği üzere üç fazlı bir MCSR'de 6 adet tristör ve 3 adet diyot bulunur. Bu tristörlerin tetikleme açıları fazlar arası 120 derecedir. Şekil 2'de reaktör için basit tek fazlı eşdeğer elektromanyetik modeli görülmektedir.



Şekil 2. MCSR Nüve Yapısı



Şekil 3. Tristör Tetikleme Açısı

MCSR'de referans alınan bir faz için iki periyottaki tetikleme zamanı örnek olarak Şekil 3'de gösterilmiştir. İlk yarı periyotta bir bacadaki tristör devredeyken diğer yarı periyotta diğer bacakta bulunan tristör devrededir. Bu tristörlerin tetikleme açıları istenilen güç seviyesine göre değişmekte olup, aralarında bir faz için 180 derece faz farkı vardır. Tristörler tetiklenmemişken reaktör nüvesindeki AC akıdan kaynaklanan sadece AC endüktans mevcuttur. Tristörlerin tetikleme açıları 180 dereceden 90 dereceye doğru gittikçe DC gerilim bileşenin değeri artacak, endüktans düşecek ve reaktif edüktif güç artacaktır. Bu artışı sınırlayan bazı parametreler mevcuttur ve bunlar; ayar sargısının gerilim değeri, reaktörün termal sınırı ve endüktans değeridir.

MCSR'ün bacaklarında akı oluşturmak için sargılar tarafından oluşturulan amper sarım aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$NI_l(t) = NI_{DC} + NI_m * \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$NI_r(t) = -NI_{DC} + NI_m * \sin(\omega t) \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitliklerden de görüldüğü gibi, bir bacak için maksimum endükleme verilirken diğer bacak için minimum endükleme verilmektedir. Bu sayede bir bacak tasarıma bağlı olarak doğrusal bölgede çalışmakta iken diğer bacak doyma bölgesinde çalışabilmektedir. DC endükleme sargıda akan DC akımdan kaynaklanmaktadır (Mehmood vd., 2021).

Aşağıda sol ve sağ bacakta endüklenen akı için bağıntılar verilmiştir.

$$Q_L(t) = Q_0 + Q_1 * \sin(\omega t - Z_1) + Q_2 * \sin(2\omega t - Z_2) + Q_3 * \sin(3\omega t - Z_3) + \dots + Q_n * \sin(n\omega t - Z_n) \quad (3)$$

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

$$Q_R(t) = -Q_0 + Q_1 * \sin(\omega t - Z_1) - Q_2 * \sin(2\omega t - Z_2) + Q_3 * \sin(3\omega t - Z_3) + \dots + Q_n * \sin(n\omega t - Z_n) \quad (4)$$

$NI_l$ : Sol bacadaki amper-sarım

$NI_r$ : Sağ bacadaki amper-sarım

$NI_{DC}$ : Bacakta oluşan DC amper-sarım

$NI_m$ : Bacaktaki AC amper-sarım maksimum değeri

$Q_L$ : Sol bacadaki akı

$Q_R$ : Sağ bacadaki akı

$Q_0$ : Bacaktaki DC akı

$Q_n$ : Bacaktaki akının n.harmonik değeri

$Z_n$ : Bacaktaki akının faz kayması

Yukarıda verilen bağıntılarda görüldüğü gibi, harmonikli endüksiyon bileşenleri reaktör akımına yansıtacaktır ve reaktörün harmonikli akım çekilmesine neden olacaktır. Bu harmonikler reaktör ömrü için zararlı olacaktır ve reaktörün daha kısa sürede arızalanmasıyla sonuçlanacaktır. Bu gibi sorunlar için harmonikleri filtreleme işlemleri yapılmaktadır. Bu filtreleme işlemleri sadece sisteme R-C-L elemanlarını bağlamaktan ziyade nüve yapısında yapılan değişikliklerle de yapılabilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi, reaktörün üçgen bağlantı yapılması durumunda üçüncü harmonikler sargı içerisine kalacaktır. Dağıtım sistemlerinde kullanılan MCSR'de 5. ve 7. harmoniklerin önemli ölçüde gerilim bozulmasına neden olmadığı yaygın olarak bilinmekte ve yapılan kapsamlı araştırmalar sonucunda da aynı kanıya varılmıştır.

## SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLEME

MCSR modelinin analizi için oluşturulan yaklaşık model sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözüm gerçekleştiren Ansoft Maxwell yazılımına aktarılmıştır. Maxwell elektromanyetik çözümlerin gerçekleştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir programdır. Karmaşık bir tasarım sürecinde ortaya çıkan modeli analitik çözümler yerine sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözmek diğer yöntemlere göre daha kolay ve hızlıdır.

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve bilgisayar yazılımlarına yönelimin artmasıyla sonlu elemanlar yöntemi ve benzer yöntemi kullanan yazılımlar üzerine ilgi artmış, tasarımcılar ve AR-GE mühendisleri için vazgeçilmez hale gelmiştir.

Ansys-Maxwell programı önce yapıyı belirli sayıda parçaya ayırıp sonrasında ise bu parçalarda çözüm yapmaktadır. Bu çözümlerin sonucunu birbirine entegre ederek nihai sonuca ulaşmaktadır (Kaymaz vd. , 2023) .

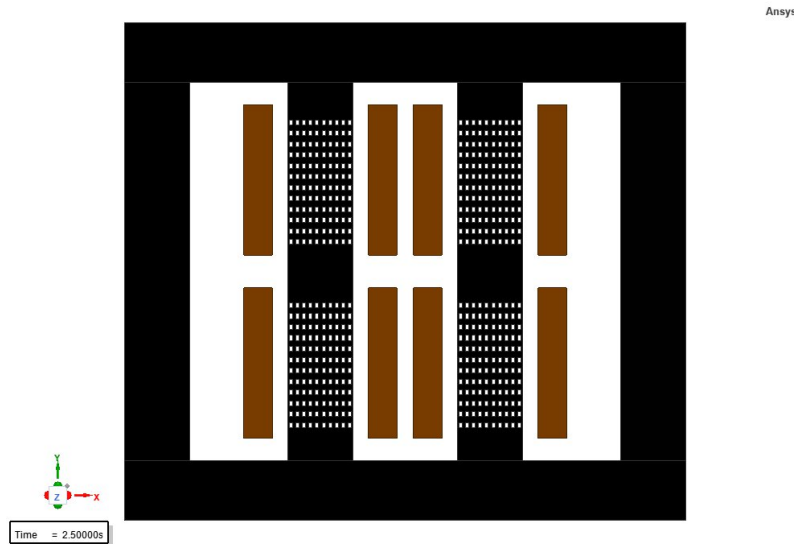
Çözümlenen model üzerinde enerji hesabıyla, temel alan ifadeleri elde edilir. Enerji hesabı için aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$W = \frac{1}{2} I^2 L \quad (5)$$

Elde edilen enerji endüktans hesabı için kullanılır ve denklem 6'da belirtilmiştir.

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

Burada,  $W$  enerjii,  $I$  reaktör akımının etkin değerini,  $L$  reaktör endüktansını göstermektedir. MCSR'ün çekirdek yapısı Şekil 2'de verilmişti, Şekil 4'de ise demir çekirdek ve sargıları içeren model görülmektedir.



Şekil 4. MCSR Sonlu Elemanlar Modeli

Şekil 4'deki modelde görülen sargılar hem AC hem de DC sargılardan oluşmaktadır. DC sargılar AC sargı arasından doğrultma devresine alınır ve reaktörü doyuma götürerek endüktansının değişimi üzerinde doğrudan etkilidir. Tasarımı yapılan MCSR'nin tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. MCSR Etiket Değerleri

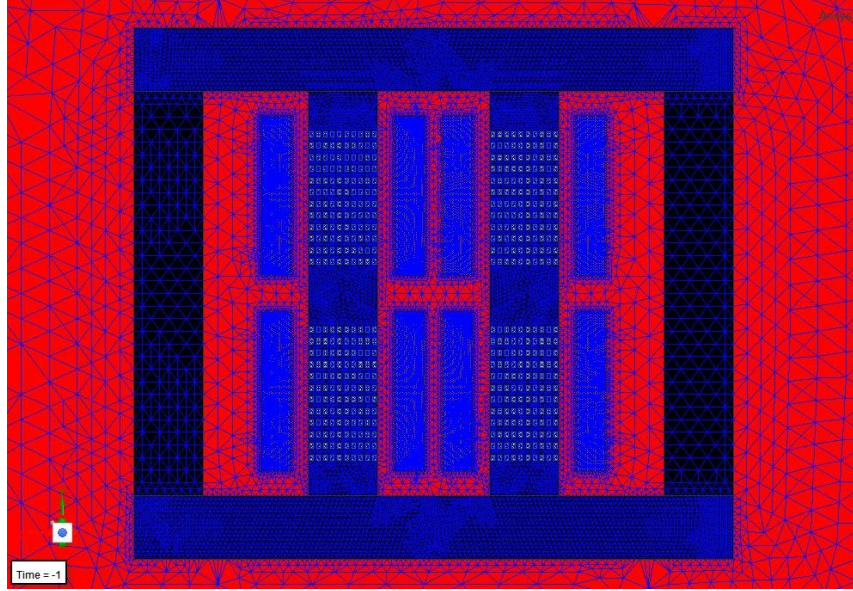
Güç (kVAr)	2000
Gerilim (kV)	31,5
Endüktans aralığı (H)	4,737-94,76
Frekans (Hz)	50

Şekil 4'te görülen kahverengi parçalar reaktör sargısını gösterirken, siyah kısım ise ana çekirdeği göstermektedir. Bu çalışmada, sargı malzemesi olarak alüminyum malzeme, nüve için ise silisli sac kullanılmıştır.

Nüvede gerekli akı yoğunluğunu sağlayarak enerjiyi toplamak için hava aralıkları kullanılmış olup, bu aralıklar modele eklenmiştir.



Program içerisinde model parçalara ayrılmıştır ve bu parçalanmış şekil Şekil 6'da verilmiştir. Bu olaya literatürde parçalama denilmektedir ve bu çalışma için model 84714 parçaya bölünmüştür. Bu sayı uygun enerji değişimi yakalanana kadar artan parça sayısıdır. Ağ oluşturma sırasında kaba ağ ayarları dikkatli bir şekilde yapılmış ve modelin ana yapısı dikkate alınarak parçalama metodolojisi tercih edilmiştir. İki boyutlu model kullanılması sayesinde analiz süresinde ciddi kısalma meydana gelmiştir.

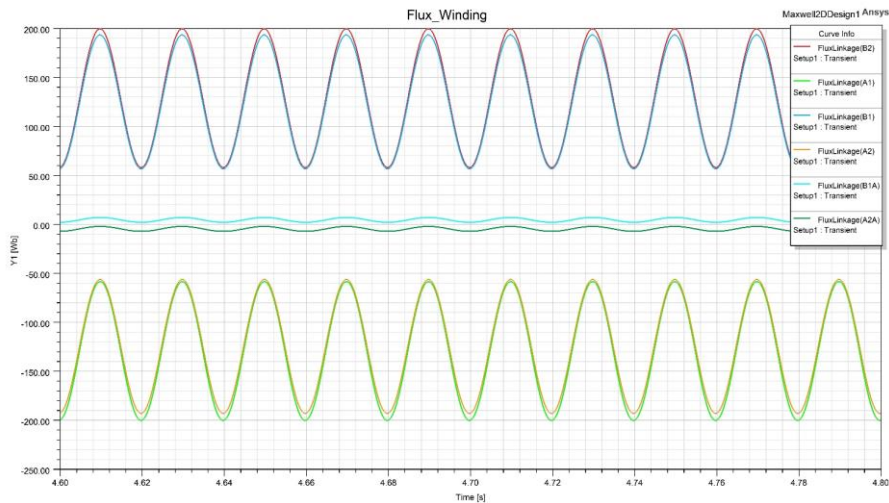


Şekil 5. Modeldeki Ağ Yapısı

Manyetik Kontrollü Reaktör sargıları, harici devre ile beslenmiş olup reaktörün çalışması için istenilen DC gerilim değeri tristör uyarma devresiyle sağlanmıştır.

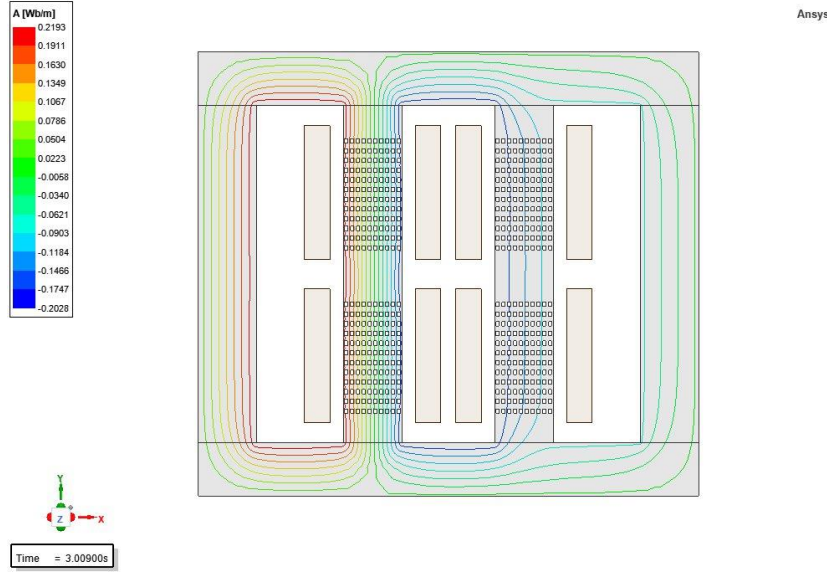
## SİMÜLASYON SONUÇLARI

MCSR'ün DC sargılarına bağlanan tristörlere tetikleme işareti verilmediğinde reaktörün nüvesinde herhangi bir DC bileşen bulunmaz yani reaktör en düşük kapisteyle, B-H eğrisinin linner bölgesinde çalışır. Tristör tetikleme açıları 180°'den 90°'ye doğru gittikçe reaktör nüvesinde DC bileşen oluşmaya başlar ve artar. Bu artışla beraber nüve doyuma doğru gitmektedir. Belirli bir süre sonra nüvede DC gerilimden dolayı akı salınım merkezi eksenenden kaymıştır. Bu kaymanın bir örneği Şekil 6'da gösterilmiştir.

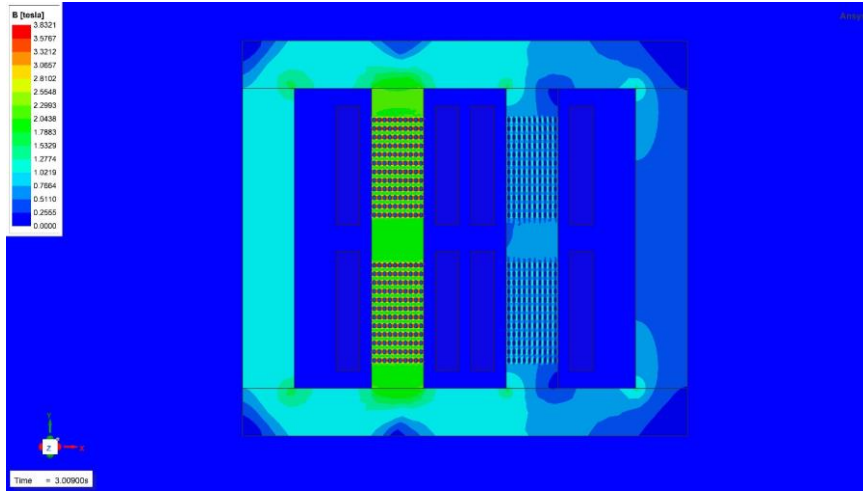


Şekil 6. Sargılardaki Akı Salınımı

Nüvede bulunan hava aralıklarında ve nüvede enerji birikir, bu enerji miktarı tristör tetikleme açılarında bağlı olarak değişir. Şekil 7’de nüvede ilk yarı periyotta oluşan maksimum akı için, Şekil 8’de ise maksimum akı yoğunluğu için dağılım gösterilmiştir.

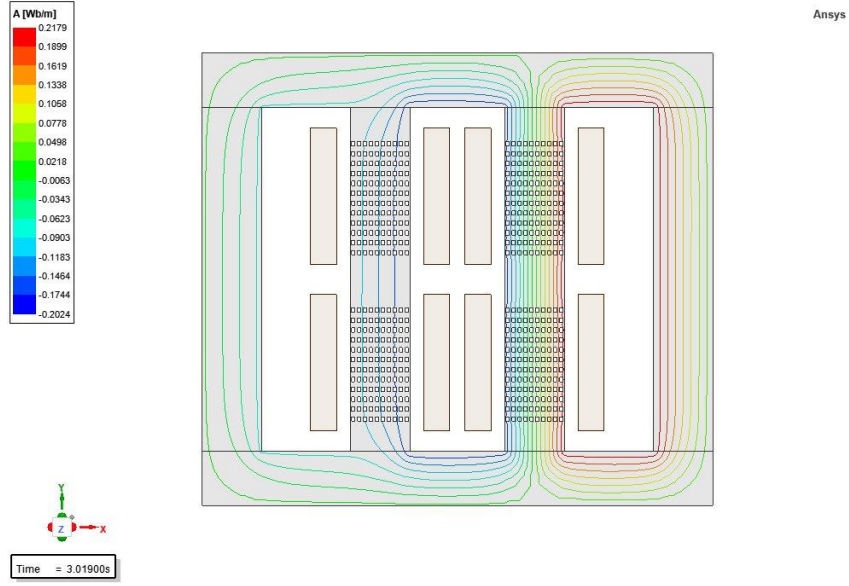


Şekil 7. İlk Yarı Periyottaki Maksimum Akı Dağılımı

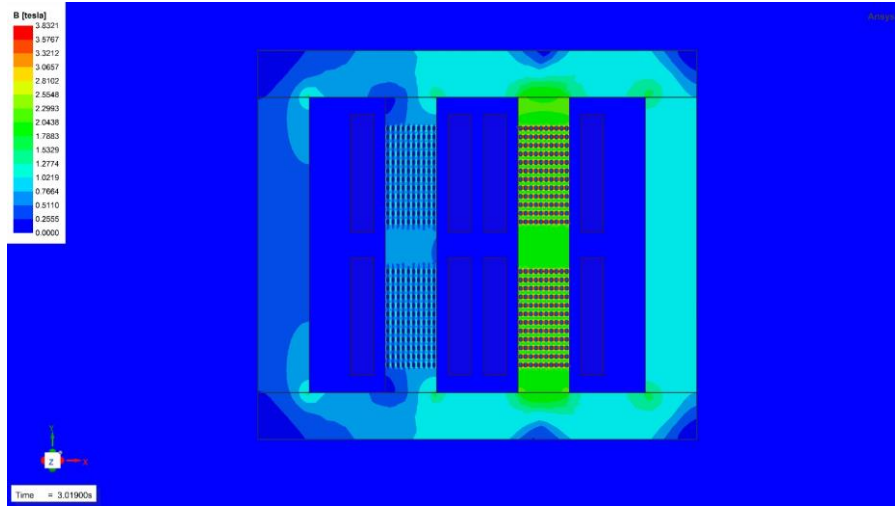


Şekil 8. İlk Yarı Periyottaki Maksimum Akı Yoğunluğu Dağılımı

Şekil 7 ve Şekil 8’de bacaklardaki boşluklu yapı görülmektedir. Bu boşluklu yapıdan dolayı bacaktaki akının kullanabileceği aktif kesit azalmıştır ve bunun sonucunda bölgesel doymalar oluşmuştur. Şekil 9’da ikinci yarı periyotta nüve bacağına meydana gelen maksimum akı dağılımı, Şekil 10’da da akı yoğunluğunun dağılımı verilmiştir.

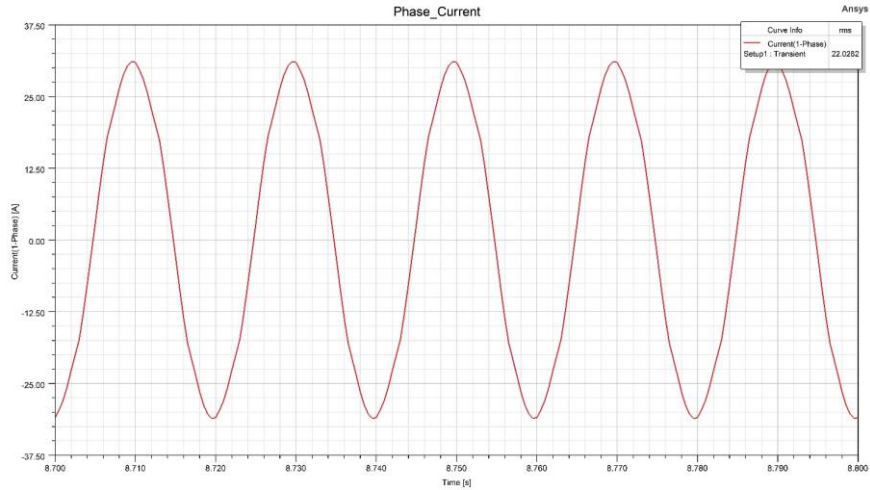


Şekil 9. İkinci Yarı Periyotta Maksimum Akı Dağılımı



Şekil 10. İkinci Yarı Periyotta Maksimum Akı Yoğunluğu Dağılımı

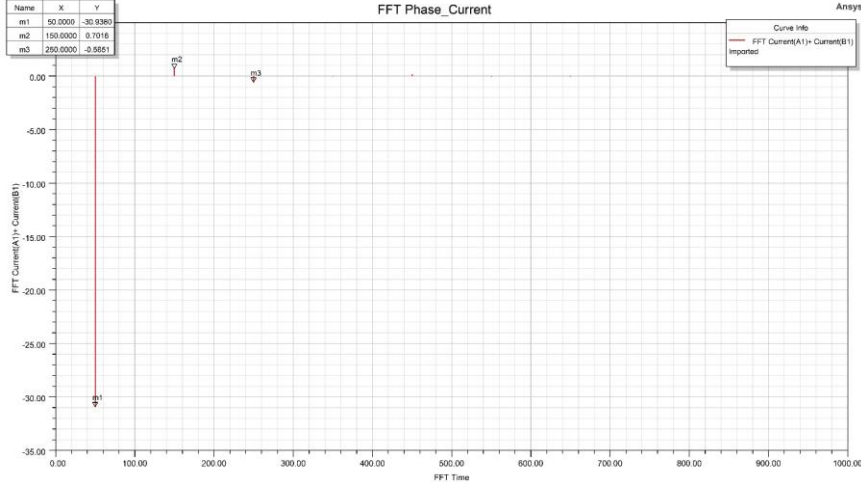
Bir periyodun yarısında bir bacak doyuma girerken bir bacak minimum endüksiyon seviyesinde çalışmakta, diğer yarısında ise aynı durum tersine gerçekleşmektedir.



Şekil 11. Hat Sargısı Tek Faz Akımı



Sargı akımının dalga şekli Şekil 11’de tek faz olarak gösterilmiştir. Bu akımın RMS değeri 22,03 A olarak elde edilmiştir. Bu akım değeri tristör tetikleme açılarına bağlıdır , güç elektroniği elemanları ve nüveden kaynaklı harmonik bileşenleri içermektedir. Ansys-Maxwell programında modelleme tek fazlı olduğu için 3.harmonik bileşenleri akım dalga şeklinde görülmektedir. Şekil 12’de harmonik analizi yapılmış ve gösterilmiştir.

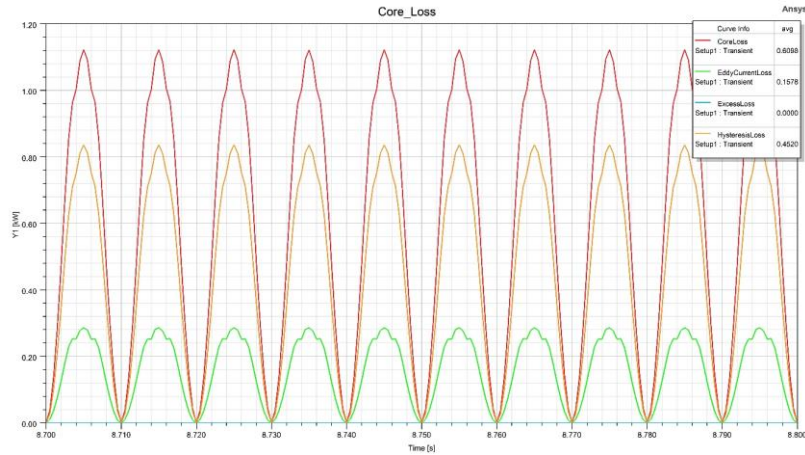


Şekil 12. Hat Sargısı Tek Faz Akımı İçin Harmonik Analizi

Üçüncü harmonikler ana harmonik bileşenin %2,26’sı olarak programda tespit edilmiş ve bu akım bileşeni üç fazlı üçgen bağlı reaktörlerde sargı içerisinde kalmakta, ana hatta yansımamaktadır. Üçgen bağlantı sargı şekillerinin yüksek gerilim seviyelerinde yapılması ekonomik olmayacaktır. Gerilim seviyesinin azaltılması için yıldız bağlantı tercih edilmekte, fakat böyle bir bağlantı durumunda harmonikler direkt olarak ana hatta yansiyacak ve ek kompanzasyon sistemlerine ihtiyaç duyulacaktır. Bu nedenle, ek harmonik bileşenleri dikkate alınmalı ve tasarım aşaması buna göre ilerlemelidir.

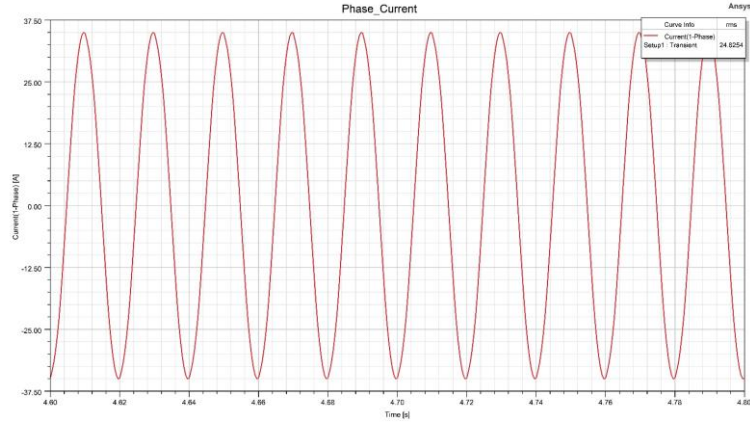
>

Beşinci harmonik değeri ana harmonik değerinin %1,891’i olarak analiz sonucunda elde edilmiştir. Yukarıdaki analiz sonuçlarında reaktör 2080 kVAr’lık (3 faz ) bir reaktif güçle yüklenmiştir. 2080 kVAr gücünde nüvede meydana gelen demir kayıpları ise Şekil 13’de verilmiştir.



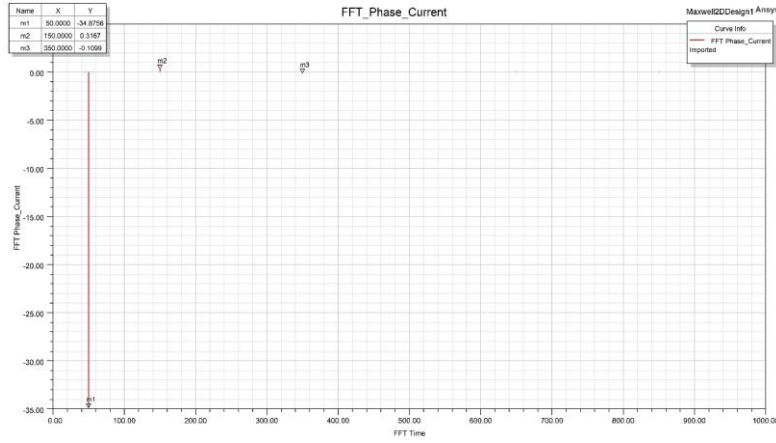
Şekil 13. Nüve Kayıplarının Zamanla Değişimi

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.



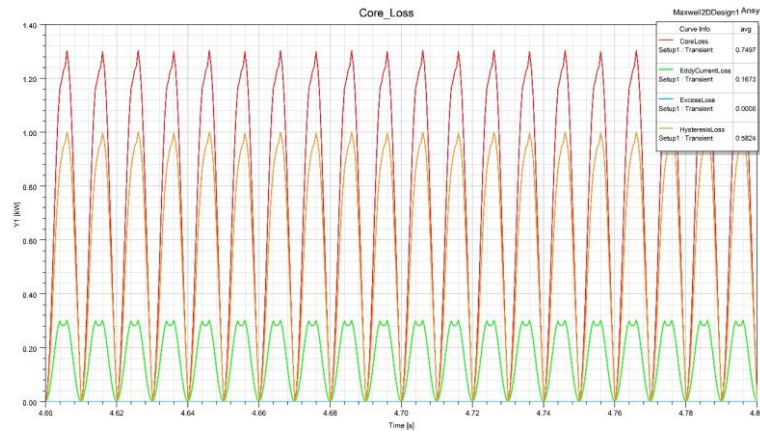
Şekil 14. Hat Sargısı Tek Faz Akımı

Şekil 14’de reaktörü kontrol eden tristörlerin tetik açılarının değişmesiyle reaktör akımında artış meydana gelmiştir. Reaktör akımı 24,82 A olmuştur ve yaklaşık nominal akımın %17 üzerindedir. Akım harmonik bileşenleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 15. Hat Sargısı Tek Faz Akımı İçin Harmonik Analiz

Yukarıdaki şekilde sargı akımının harmonik bileşenleri gösterilmiştir. Üçüncü harmonik değeri ana harmonik bileşenin %0,9’u, beşinci harmonik değeri ise ana harmonik bileşenin %0,315’i olarak analiz sonuçlarında elde edilmiştir. Reaktör nüvesinde endüklenen akıdan kaynaklı demir kayıpları meydana gelmekte olup, ekstra yüklenme durumundaki demir kayıpları aşağıda verilmiştir.



Şekil 16. Aşırı Yüklü Durumda Nüve Kayıpları

Fazla endüktif yükle yüklenmesi durumunda nüvede 750 W’lık (1 faz) kayıp meydana gelmiştir. 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.

**DENEYSEL ÇALIŞMA****Şekil 18. a. MCSR Üretim Sonu****b. MCSR Testi**

Yukarıda test edilen MCSR görülmektedir. Tristör ve diyotlar sargı uçlarından alınıp izolatörlere gelen burçlara bağlanmıştır. Devreye alma sırasında güç elektroniği elemanlarının uçlarında meydana gelecek ani gerilimlere karşı ek önlemler alınmaktadır. Gerilim yavaş yavaş artırılıp nominal seviyeye getirilmiş, sonrasında ise tristörlerin tetikleme açıları değiştirilmeye başlanmış 180°'den 90°'ye doğru yavaş yavaş azaltılmıştır. Bu açıların azalmasına paralel olarak doğrultulan gerilim değeri de artmaya devam etmiştir. Gerilime bağlı olarak reaktör linneer bölgeden çıkmış ve nominal güce ulaşmıştır.

**Tablo 2. MCSR Tetik Derecesi ve Güç Değeri (test)**

Tetik Açısı	Q(kVAr)	V(F-F)
164	121	31500
150	420	31500
145	570	31500
140	740	31500
130	1120	31500
125	1340	31500

Tetik Açısı	Q(kVAr)	V(F-F)
120	1570	31500
115	1820	31500
112	2000	31500
110	2070	31500
105	2350	31500

**Tablo 3. MCSR Kayıpları ( test )**

	75 C°
2000 kVAr	32329 W (Pk)

MCSR yükte test edilmiş ve tam yük için kayıplar, güç değeri cinsinden kaydedilmiştir. Bilindiği gibi, reaktörlerde tek sargı bulunmaktadır ve çıkış sargısı yoktur. Bu yüzden tam yüklenmesi durumunda nüve kayıpları ve sargı kayıpları beraber artacaktır. Bu artışın birlikte olması nedeni ile nüve kayıpları, sargı kayıpları ve ek kayıpları ayrı



ayrı tespit etmek zordur. Bunun için ilave yöntemler geliştirilmeli ya da nüve kayıpları endüksiyona bağlı olarak tahmin edilmelidir.

## SONUÇ

Bu çalışmada, Ansys-Maxwell programı kullanılarak Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör tek fazlı eşdeğer devresi modellenmiş ve elektromanyetik analiz yapılmıştır. Analizde kullanılan model basit eşdeğer model olmasından dolayı çözüm daha basit ve gerçeğe daha yakındır. Elektromanyetik analiz sonucunda ve test sırasında reaktör nominal güce yakın bir güçte yüklenmiş, çektiği akım harmonikleri, nüvede meydana gelen akı dağılımı, nüve kayıpları, tristörde meydana gelen tetikleme açısı değişimine verdiği tepki incelenmiştir. Ardından reaktör nominal gücün üzerinde yüklenmiş, akım harmoniklerinde ve kayıplarda meydana gelen değişimler gözlenmiştir.

Testler ve analizler sonucunda akım harmoniklerinin reaktörün yüklenmesi ile de ilgili olduğu sonucuna varılmıştır. Reaktör nominal güç değerine yaklaştıkça reaktör akımındaki harmonik bileşenlerinin değeri 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 ve üç fazlı üçgen bağlı test edildiği için akım dalga şeklinde üçüncü harmonik bileşenleri oluşmuş ama test esnasında net bir şekilde gözlemlenememiştir. Böyle bir sonuç tasarım aşamasında öngörülmüş ve tasarım kayıp optimizasyonu buna göre yapılmıştır. Reaktörün nüvesinde meydana gelen kayıplar eddy ve histeresiz kayıplarıdır. Nüvede oluşan akı değeri arttıkça toplam nüve kayıplarının daha fazla olduğu test ve analiz ortamında görülmüştür.

Reaktör test ortamında tristörlerin 112 derecelik tetik açısıyla nominal güç değerine ulaşırken analiz ortamında ise reaktör 100 derecelik tetik açısıyla nominal güç değerine ulaşmıştır. Tasarım aşamasında bu değişimlere dikkat edilmiş ve reaktör tasarımı buna göre yapılmıştır.

Analiz ortamında nüve kayıpları nominal güç değerinde 1830 W hesaplanmıştır. Sargı kayıpları ise 75 derece sargı sıcaklıkları baz alınarak analiz ve hesap ortamında 25610 W olarak hesaplanmıştır. Kazan, kapak ve ek destek parçalarında meydana gelen kayıplar ise 3000-5000 W bandında beklenmektedir. İleriki çalışmalarda kazan, ek aksesuarlar ve sargıda meydana gelen AC kayıplar, nüve birleşme noktalarında meydana gelen kayıplar ve harmonikler üzerine çalışmalar yapılacaktır.

Test edilen MCSR de toplam kayıplar 75 derece sıcaklıkta 32329 W olarak elde edilmiştir. Kayıplar beklenen değere yakındır.

## TEŞEKKÜR

Gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada akademik destekleri için Sakarya Üniversitesi'ne ve sağladığı imkanlar için ASTOR A.Ş.'ye teşekkürü borç bilirim.

## KAYNAKLAR

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.

Chen, X., Chen, B., Tian, C., Yuan, J., & Liu, Y. (2011). Modeling and harmonic optimization of a two-stage saturable magnetically controlled reactor for an arc suppression coil. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(7), 2824-2831.

Karymov, R. R., & Ebadian, M. (2007). Comparison of magnetically controlled reactor (MCR) and thyristor controlled reactor (TCR) from harmonics point of view. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29(3), 191-198.

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.

Xu, X. (2009, December). The status and development of magnetically controlled reactor. In *2009 International Conference on Test and Measurement* (Vol. 2, pp. 375-377). IEEE.

Mehmood, K., Cheema, K. M., Tahir, M. F., Saleem, A., & Milyani, A. H. (2021). A comprehensive review on magnetically controllable reactor: Modelling, applications and future prospects. *Energy Reports*, 7, 2354-2378.

Kaymaz, İ., Bayrak, M., & Tursun, S. Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi.