

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK KONTROLLÜ ŞÖNT REAKTÖR TASARIMI VE
ELEKTROMANYETİK ANALİZLERİNİN
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmet KAYMAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Bilim Dalı

HAZİRAN 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK KONTROLLÜ ŞÖNT REAKTÖR TASARIMI VE
ELEKTROMANYETİK ANALİZLERİNİN
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmet KAYMAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet BAYRAK

HAZİRAN 2024

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör Tasarımı ve Elektromanyetik Analizlerinin Gerçekleştirilmesi” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(01/06/2024).

İsmet KAYMAZ

Çok değerli aileme...

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve lisans eğitimin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet BAYRAK'a ve müdürüm Semih TURSUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda teorik bilgilerimi uygulamaya dökmemde maddi ve manevi destek olan Tasarım ve Analiz Mühendisi olarak çalışmaya devam ettiğim Astor Enerji'ye teşekkürlerimi sunarım .

İsmet KAYMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
1.2. Çalışmanın Kapsamı	3
1.3. Literatür Özeti	3
1.4. Çalışmanın Gerçekçi Kısıtlar Açısından Analizi	8
2. MANYETİK KONTROLLÜ REAKTÖR TASARIMI VE ANALİZİ	11
2.1. Yöntem Hakkında Genel Bilgi	11
2.1.1. Şönt reaktörler	12
2.1.2. Seri reaktörler	13
2.1.3. Kontrollü reaktörler	14
2.1.4. Reaktör kayıpları	19
2.1.4.1. Nüve kayıpları	19
2.1.4.2. Bakır kayıpları	20
2.1.5. Reaktörlerde meydana gelen harmonikler	21
2.1.6. Reaktörlerde soğutma	23
2.1.7. Reaktörlerde kullanılan manyetik malzemeler	26
2.1.8. Reaktörlerde nüve kesit alanı	27
2.1.9. Manyetik kontrollü reaktör çalışma prensibi	28
2.1.10. 2.1.10. MCR ve alternatif ürünler ile karşılaştırması	30
2.1.11. Reaktörlerin Bakımı	33
2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modelleme	34
3. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE YORUMLANMASI	38
3.1. Nüvede Meydana Gelen Akı Dağılımı ve Kayıplar	38
3.2. Sargı Akımı	41
4. UYGULAMA	44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	56

KISALTMALAR

A	: Hava
D	: Sargılar içinden yönlendirmeli akış
F	: Soğutma elemanları içinden zorlamalı akış
K	: Yanma noktası 300 derecenin üzerindeki sentetik yalıtkan sıvı
L	: Yanıcı olmayan sıvı
MCR	: Manyetik kontrollü reaktör
MCSR	: Manyetik kontrollü şönt reaktör
N	: Soğutma elemanları içinden doğal olarak akış
O	: Yanma noktası 300 derecenin altında olan mineral yalıtkan sıvı
STATCOM	: Statik senkron kompansatör
TCR	: Tristör kontrollü reaktör
TCSC	: Tristör kontrollü seri kapasitör
W	: Su

SİMGELER

S	: Görünür güç [VA]
P	: Aktif güç [W]
Q	: Reaktif güç [VAr]
$P_{Nüve}$: Nüve kayıpları
P_h	: Histerisiz kayıpları
P_e	: Eddy kayıplar
k_e	: Eddy kayıp katsayısı
k_h	: Histerisiz kayıp katsayısı
f	: Frekans [Hz]
B_{max}	: Maksimum akı yoğunluğu [Tesla]
t	: kalınlık
V	: Hacim
W	: Sarım sayısı
B	: Akı yoğunluğu
ρ	: Öz direnç [Ohm-metre]
B_a	: Aksiyal akı yoğunluğu
B_r	: Radyal akı yoğunluğu
V_s	: Sargı hacmi
P_{ea}	: Aksiyal eddy kayıp yoğunluğu
P_{er}	: Radyal eddy kayıp yoğunluğu
B_L	: Sol bacak akı yoğunluğu
B_R	: Sağ bacak akı yoğunluğu
B_0	: DC akı yoğunluğu
B_1	: 1.harmonik akı yoğunluğu
B_2	: 2.harmonik akı yoğunluğu
B_3	: 3.harmonik akı yoğunluğu
B_n	: n.harmonik akı yoğunluğu
Q_1	: 1.harmonik akı yoğunluğunun faz kayması [Derece]
Q_2	: 2.harmonik akı yoğunluğunun faz kayması
Q_3	: 3.harmonik akı yoğunluğunun faz kayması

u	: Manyetik geçirgenlik
u₀	: Boşluğun manyetik geçirgenliği [Henry/Metre]
H	: Manyetik alan şiddeti [Amper/Metre]
e	: Gerilim [Volt]
Q	: Akı [Weber]
J	: Akım yoğunluğu [Amper/milimetre ²]
D	: Elektrik akı yoğunluğu [Coulomb/Metre ²]
E	: Elektrik alan şiddeti [Volt/Metre]
W_m	: Enerji [Joule]
L	: Endüktans [Henry]
I	: Akım [Amper]

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. TCR ve MCR karşılaştırılması.....	33
Tablo 2.2. MCR plaka değerleri.....	36
Tablo 3.1. MCR harmonik yüzdeleri.....	43
Tablo 4.1. MCR test sonuçları.....	48
Tablo 4.2. MCR nominal sıcaklığa ötelenmiş kayıplar.....	48

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Reaktör eşdeğer devresi.	11
Şekil 2.2. Görünür güç vektörel gösterimi.	12
Şekil 2.3. Tipik bir histerezis döngüsü ve doyulabilir bir reaktörün amplifikasyon ilkesi [10].	16
Şekil 2.4. MCR kullanım amaçları.	17
Şekil 2.5. Kazan içerisindeki yağın akış yönü.	24
Şekil 2.6. Kazan içerisindeki yağın akış yönü ve havanın tatbik edilmesi.	25
Şekil 2.7. OFAF soğutmalı reaktör.	25
Şekil 2.8. MCR tek faz manyetik eşdeğer modeli.	28
Şekil 2.9. MCR tek faz elektrik eşdeğer modeli.	28
Şekil 2.10. MCR üç faz elektrik eşdeğer modeli.	29
Şekil 2.11. MCR tristör tetik açıları.	29
Şekil 2.12. Tristör Kontrollü Reaktör.	31
Şekil 2.13. TCSC ve STATCOM.	31
Şekil 2.14. MCR ve kapasitör bankası.	32
Şekil 2.15. MCR ve kapasitör bankası reaktif güç üretimi.	32
Şekil 2.16. MCR sonlu elemanlar modeli.	36
Şekil 2.17. Manyetik malzeme B-H eğrisi.	36
Şekil 2.18. MCR parçalanmış FEM modeli.	37
Şekil 3.1. MCR sol bacak akı dağılımı.	38
Şekil 3.2. MCR sağ bacak akı dağılımı.	39
Şekil 3.3. MCR sol bacak akı yoğunluğu dağılımı.	39
Şekil 3.4. MCR sağ bacak akı yoğunluğu dağılımı.	40
Şekil 3.5. MCR nüvede indüklenen akı salınımı.	40
Şekil 3.6. MCR nominal yüklenme nüve kayıpları.	41
Şekil 3.7. MCR yük aşımı durumunda nüve kayıpları.	41
Şekil 3.8. Tek faz nominal yüklenme sargı akımı.	42
Şekil 3.9. Tek faz nominal yüklenme sargı harmonik içeriği.	42
Şekil 3.10. Tek faz yük aşımı durumunda sargı akımı.	43
Şekil 3.11. Tek faz yük aşımı durumunda sargı harmonik içeriği.	43
Şekil 4.1. MCR buşing bağlantısının yapılması.	45
Şekil 4.2. MCR aktif kısım üretim sonu.	45
Şekil 4.3. MCR üretim sonu.	46
Şekil 4.4. Test aşaması.	47

MANYETİK KONTROLLÜ ŞÖNT REAKTÖR TASARIMI VE ELEKTROMANYETİK ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Tüm dünyada ve ülkemizde, teknolojiye meydana gelen gelişmeler, bu teknolojik ürünlere artan talep nedeniyle enerji ihtiyacı yıllar geçtikçe giderek artmaktadır. Enerji ihtiyacındaki bu artış, enerji üretim, iletim ve dağıtım şebekeleri üzerinde, yetersiz iletim kapasiteleri yüzünden olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Oluşan bu ilave enerji ihtiyacını karşılamak için üretim artışının gerçekleşmesinin yanında, şebekenin doğru bir şekilde koordine edilmesi ve planlanması da önem arz etmektedir. Bu planlamanın başında artan hat kayıpları ve bu kayıpların azaltılması gelmektedir. Kayıplar günün belirli zamanlarında farklılık gösterebilir, gece saatlerinde kapasitif, gündüz saatlerinde ise endüktif etki daha baskın hale gelmektedir. Kompanzasyon sistemi maksimum kapasitif yüklenme durumu baz alınarak tasarlanmalıdır. Yanlış tasarlanmış iletim ve dağıtım hatları sistemde gereksiz yük oluşmasına neden olur. Yatırım maliyetleri büyüktür bu yüzden sistemdeki değişiklikler maddi sonuçları beraberinde getirir. Enerji iletim sistemi transformatörler , kablolar , koruma malzemeleri, reaktörler olmak üzere çeşitli yardımcı ekipmandan oluşur. Üretilen enerji iletilir. Dağıtım hatları , iletim hatlarına bağlanır. Kullanıcılar ise dağıtım hatlarından beslenirler.

Elektrik güç sistemlerinde yükün azaltılmasıyla kapasitif akım artar. Artan bu kapasitif akım reaktif güç üretimine neden olur ve bunun sonucunda hattın iletebilecek aktif akım azalmakta, hat sonu gerilimi yükselmektedir. Doğal olarak aynı aktif güç değerini iletmek için hat kayıpları da mutlak akımın karesi şeklinde artacaktır. Oluşan bu reaktif gücün tüketilmesi ve akımın mutlak büyüklüğünün azaltılması gerekmektedir. Bunun için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Ancak, Manyetik Kontrollü Reaktör büyük bir aralıkta, yükte, yumuşak bir şekilde endüktif kapasitesini ayarlayabilme özelliğiyle, reaktif güç dengesini gerçekleştirebilecek en uygun çözümlerden biridir. Diğer reaktörlerden farklı kılan en önemli özelliği ayarlanabilir kapasitesidir.

Reaktörler, kapasitif etki altında olan hatlarda ve işletmelerde endüktif-kapasitif güç dengesini sağlamak için endüktif yük görevi görürler. Yaygın olarak DC sürücülerin ağırlıklı olduğu işletmelerde, uzun iletim hatlarında, yarı iletkenin yaygın olarak kullanıldığı güç sistemlerinde, baz istasyonlarında, uzun kabloların kullanıldığı sistemlerde, hastaneler ve magzalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kapasitif etkinin sebep olduğu başlıca sorunlar vardır. Ceza ödenmesi , Sistem içindeki cihazların ve sistem ömrünün azalması , Enerji iletiminin veriminin düşmesi, Bakım-onarım masraflarındaki artış reaktif güç artışının oluşturduğu sorunlardan birkaç tanesidir.

Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörler, iletim sisteminin reaktif kapasitesini düzenlemeye yarayan çok yönlü bir AC iletim cihazıdır. MCR'nin analizi çok önemli bir faktördür, son yıllarda bilim adamları farklı bakış açılarıyla MCR çalışmaları yapmışlardır. MCR yaklaşık eşdeğer devre üzerinden analiz edilmektedir ve bunun başlıca nedeni karmaşık olan elektriksel yapısıdır. MCR kontrol sistemi, kontrol yöntemine göre açık çevrim kontrol, kapalı çevrim kontrol olarak sınıflandırılabilir. Açık çevrim kontrolde çıkıştan geri besleme alınmaz. Bozucu etkiler sistem tarafından tespit edilemez. Açık çevrim kontrol yapısı hassas olmayan sistemlerde kullanılır.

Kapalı çevrim kontrol sisteminde çıkıştan geri besleme alınır. Bozucu etki sistem tarafından tespit edilebilir. Hassas bir kontrol sağlanmış olur. MCR'lerde genelde kapalı çevrim kontrol kullanılmaktadır.

MCR'de meydana gelen kayıplar nüve kayıpları, sargı kayıpları ve ek kayıplardan oluşur. Demir Çekirdekli Reaktörlerin nüvesinde depolanan akıdan dolayı nüvede kayıplar meydana gelir. Reaktör yapısına ve çeşidine bağlı olarak nüvenin doyumda çalışma durumlarına rastlanabilir ama standart şönt reaktörlerde böyle bir durum istenmez. Bakır kayıpları sargıların DC ve AC kayıpları olmak üzere iki çeşittir. Bu kayıp değeri reaktör buşinglerine gelen gerilim değerine göre ve reaktörün çektiği akıma bağlı olarak değişiklik gösterir. Ek kayıplar ise sargı ve nüve dışında kalan metal kısımlarda oluşan kayıplardır.

MCR harmonik açıdan reaktörün yüküne bağlı olarak değişmektedir. Reaktör yükü arttıkça harmonik içeriği azalmaktadır. Benzer ürün olan Tristör Kontrollü Reaktöre göre harmonik içeriği fazladır. MCR nüvesindeki boşluğun kordinasyonu ile reaktör harmonik içeriği azaltılabilmektedir.

MCR'de soğutma sistemi de önemlidir. Reaktörler genelde ONAN soğutmaya göre tasarlanır.

Güç artışı istenmesi durumunda ONAF sisteme geçilir.

FEM analizleri son yıllarda yaygınlaşmış ve önemli hale gelmiştir. Bu yazılımlar sonlu ağ oluşturma mantığıyla çalışan büyük ölçekli bir yazılımdır ve elektromanyetik sektörde yaygın olarak kullanılır. Karmaşık AR-GE sürecine sahip ürünlerde bu tür yazılımlar üretim öncesi harcamayı ve karşılaşılabilecek sorunları azaltır. Elektromanyetik modelin mümkün olduğu kadar sade olmasına dikkat edilmelidir.

Analitik hesapları yapılan ürün için üretim aşaması ciddi önem arz eder. Üretimden kaynaklı hatların tespiti ciddi zaman alıcı ve zordur. Protatip ürünün üretilmesi aşamasında, yetersiz ve uygun olmayan kurutmadan, yağın nemli olmasından, yetersiz ham madde kullanımından kaçınılmalıdır.

MCR test aşamasında karmaşık ve anlaşılması zor yapısından dolayı testler titizlikle yapılmalıdır. Reaktöre yapılan testler ile sarım sayıları doğrulanmalıdır.

Direnç ölçümünde "RATECH WR50-13" cihazı kullanılmıştır. Her faz için direnç ölçümü yapılır. Her fazdaki uçlarda yakın değerlerin ölçülmesi beklenir. Değerlerin arasındaki farkın fazla olması durumunda test tekrarlanmalı ya da ürün gözden geçirilmelidir.

Oran testi "OMICRON CPC100" cihazı ile yapılmaktadır. Reaktör girişinden 400 V uygulanmakta ve diğer uçlarda oluşan gerilim ölçülmektedir. Tasarım aşamasında bu test sonucunda okunacak değerler hesaplanmaktadır. Ölçüm sonuçları tasarım esnasında hesaplanan değerler ile yakın çıkması beklenir.

Reaktöre AC yüksek gerilim verilmeden önce son olarak izolasyon testi yapılmalıdır. Bu test “MEGGER MIT 525” cihazı ile yapılır. Sonrasında ise uygulanan ve indüklenen gerilim testleri yapılmaktadır.

Reaktör sargısının belirli sınımlarından alınım uçlar tristörler ile hatasız bağlanmasına dikkat edilmelidir. Test ortamında tristörlerin tetik açıları 90 dereceye doğru azaltılır.

Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörler son yıllarda dünya üzerinde yaygın olarak kullanılmaya başlandığı gibi, Türkiye’de de yaygınlaşmaya ve sistem tasarımcılarının ilgi odağı haline gelmeye başlamıştır. Tüm bu gelişmelere rağmen Türkiye’de bu ürün detaylı bir şekilde incelenmemiş ve tam olarak bilinmemektedir.

Bu çalışmada, 2MVA’r gücünde Manyetik Kontrollü Reaktörün teknik ve ekonomik açıdan en uygun tasarımı, tasarımın en uygun şekilde elektromanyetik analiz programına tanımlanması, reaktörün aktif güç kayıplarının analiz ortamında ve test ortamında tespiti, reaktör akımının yüklenme rejimine göre harmonik içeriğinin tespit edilmesi ve alternatif ürünlerle karşılaştırılması, alternatif ürünlerle teknik ve ekonomik açıdan uygunluğu, uygunsuzluğunun araştırılması, çalışmaları yapılmıştır. Bu tez çalışması sonucunda, iletim hatlarının en uygun şekilde koordine edilmesi, ihtiyaç olan reaktif güç dengesi ve değişken reaktif güç ihtiyacı için geliştirilen Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörün çalışma yapısı anlaşılmıştır.

İleriki akademik çalışmalarda kazan, ek aksesuarlar ve sargıda meydana gelen kayıplar, nüve birleşme noktalarında meydana gelen kayıplar ve harmonikler, MCR’nin diğer kompanzasyon sistemleri ile koordineli kompakt bir şekilde çalışması, tepki süresinin kısaltılması, ses seviyesinde iyileştirme, kayıplarının azaltılması üzerine çalışılacaktır.

MAGNETIC CONTROLLED SHUNT REACTOR DESIGN AND PERFORMANCE OF ELECTROMAGNETIC ANALYSIS

SUMMARY

Both worldwide and within our country, the developments in technology and the increasing demand for technological products are leading to a progressively rising energy requirement. This escalation in energy demand adversely affects energy production, transmission, and distribution grids due to insufficient transmission capacities. To meet this additional energy demand, besides increasing production, proper coordination and planning of the grid are crucial. At the forefront of this planning is the need to address increasing line losses and reduce them. Losses may vary at different times of the day, with capacitive effects being more dominant during nighttime and inductive effects during daytime. The compensation system should be designed based on maximum capacitive loading. Improperly designed transmission and distribution lines cause unnecessary load on the system. Investment costs are large, so changes in the system bring financial consequences.

The energy transmission system consists of various auxiliary equipment such as transformers, cables, protection materials and reactors. The energy produced is transmitted. Distribution lines are connected to transmission lines. Users are fed from distribution lines.

In electrical power systems, reducing the load increases capacitive current. This increased capacitive current leads to reactive power generation, resulting in a decrease in the active current that can be transmitted through the line and an increase in line-end voltage. In order to transmit the same active power, line losses will also be increased as the square of absolute current. It is necessary to consume this reactive power and reduce the absolute magnitude of the current.

Various methods have been developed for this purpose. However, the Magnetic Controlled Reactor, with its ability to smoothly adjust inductive capacitance over a wide range of loads, is one of the most suitable solutions for achieving reactive power balance.

The most important feature that makes it different from other reactors is its adjustable capacity. Reactors serve as inductive loads to ensure inductive-capacitive power balance in lines and enterprises under capacitive influence. It is widely used in businesses where DC drivers are dominant, long transmission lines, power systems where semiconductors are widely used, base stations, systems where long cables are used, hospitals and stores. There are fundamental problems caused by the capacitive effect. Payment of fines, shortening the life of the devices and the system within the system, decreasing energy transmission efficiency, increasing maintenance and repair costs are some of the problems caused by the increase in reactive power.

Magnetically Controlled Shunt Reactors are a versatile type of AC transmission device that serves to regulate the reactive capacity of the transmission system. The analysis

of MCR is a very important factor. In recent years, scientists have conducted MCR studies with different perspectives. MCR is analyzed on an approximately equivalent circuit and this is mainly due to its complex electrical structure.

MCR control system can be classified as open-loop control and closed-loop control according to the control method. In open loop control, no feedback can be received from the output. Disruptive effects cannot be detected by the system. Open loop control structure is used in non-sensitive systems. In the closed loop control system, feedback is received from the output. The disruptive effect can be detected by the system. A precise control is provided. Closed loop control is generally used in MCRs.

Losses occurring in MCR consist of core losses, winding losses and additional losses. Losses occur in the core of Iron Core Reactors due to the flux stored in the core. Depending on the reactor structure and type, the core may operate in saturation, but such a situation is not desired in standard shunt reactors. Copper losses are of two types: DC and AC losses of the windings. This loss value varies depending on the voltage value coming to the reactor bushings and the current drawn by the reactor. Additional losses are losses occurring in metal parts other than the winding and core. MCR's harmonic content changes depending on the load of the reactor. As the reactor load increases, the harmonic content decreases. It has more harmonic content than the similar product Thyristor Controlled Reactor. By coordinating the space in the MCR core, the harmonic content of the reactor can be reduced. The cooling system is important in MCR. The reactor is generally designed for ONAN cooling. The cooling system is also important in MCR. The reactor is generally designed for ONAN cooling. If a power increase is desired, the ONAF system is switched to. FEM analysis have become widespread and important in recent years. These software are large-scale software that work with finite networking logic and are widely used in the electromagnetic industry. In products with complex R&D processes, such software reduces pre-production expenses and problems that may be encountered. Care should be taken to keep the electromagnetic model as simple as possible.

The production phase is of great importance for the product for which analytical calculations are made. Detecting errors caused by production is seriously time-consuming and difficult. During the production phase of the prototype product, insufficient and improper drying, moist oil, and use of insufficient raw materials should be avoided.

During the MCR testing phase, tests must be carried out meticulously due to its complex and difficult to understand structure. The number of winding turns must be verified by tests performed on the reactor.

“RATECH WR50-13” device was used to detect resistance. Resistance is measured in each phase. Resistances between phases are expected to be close. If the difference between the values is large, the test should be repeated or the product should be reviewed.

Ratio testing is done with the “OMICRON CPC 100” device. 400 V is applied from the reactor inlet and the voltage at the other ends is measured.

During the design phase, the values to be read as a result of this test are calculated. Measurement results are expected to be close to the values calculated during design.

Finally, an insulation test must be performed before applying AC high voltage to the reactor.

This test is performed with the “MEGGER MIT 525” device. Afterwards, applied and induced voltage tests are performed.

Care should be taken to ensure that the ends of certain windings of the reactor winding are connected to thyristors without any errors.

In the test environment, the trigger angles of the thyristors should be reduced towards 90 degrees.

Magnetic Controlled Shunt Reactors have begun to be widely used worldwide in recent years and have become the focus of interest for system designers in Turkey as well. Despite all these developments, this product has not been thoroughly examined and fully understood in Turkey.

In this study, the technically and economically most suitable design of a 2MVar Magnetic Controlled Reactor, defining the design in the electromagnetic analysis program, detecting the active power losses of the reactor in the analysis and test environment, determining the harmonic content of the reactor current according to the loading regime, and comparing it with alternative products in terms of technical and economic suitability or unsuitability, have been conducted.

As a result of this thesis, the working structure of the Magnetic Controlled Shunt Reactor developed for the optimal coordination of transmission lines, the required reactive power balance, and the variable reactive power requirement has been understood.

In future academic studies, the losses occurring in the boiler, additional accessories and winding, losses and harmonics occurring at the core junctions, the compact operation of MCR in coordination with other compensation systems, shortening the response time, improving the sound level and reducing losses will be studied.

1. GİRİŞ

Çalışmanın giriş bölümünde, ele alınan problemin tanımlanması, amaç ve hedeflerin, çalışmanın sınırlarının ve kapsamının belirlenmesi, literatürde yer alan kaynaklar araştırılarak önceden yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler sunulması hedeflenmiştir.

Enerji ihtiyacı dünya genelinde nüfus artışı ve teknolojiye artan talebe bağlı olarak artmaktadır. Elektrik enerjisi, kullanımı ve üretimi kolay, verimi yüksek, temiz bir enerji çeşididir. Tüm bu nedenlerden dolayı ve teknolojik ürünlere talebin artmasıyla son yıllarda elektrik kullanımı artmıştır. Kullanımın artmasına bağlı olarak elektrik enerjisinin nasıl en ucuz ve en kaliteli şekilde kullanıcıya ulaştırılacak sorusu üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İlk çalışmalardan bir tanesi elektrik enerjisinin doğru akımla taşınması fikri olmuştur ama doğru akımla taşıma yüksek teknoloji gerektireceği için pek olumlu karşılanmamıştır. Tek çare olarak alternatif akım kalmış ve uygulamalar bunun üzerine olmuştur. Alternatif akım kullanılmasıyla birlikte transformatörler vazgeçilmez hale gelmiştir.

Transformatörler sayesinde aktarılan elektrik enerjisi yaklaşık sabit kalmak şartıyla gerilim seviyesi yükseltilir ve buna bağlı olarak akım değeri düşer. Akımın düşmesiyle birlikte iletim hatlarında meydana gelen aktif güç kayıpları azalır. Sadece gerilimin yükselmesi kayıplar için tek çözüm değildir. Reaktif ve kapasitif etkilerden dolayı iletim hattında kirlilik meydana gelir. Bu kirlilik akım ve gerilim dalgalarında bozulmalara neden olur, gerilimde ve akımdaki bozulma cihazların kullanım ömürleri üzerine direkt etki edecektir. Bu yüzden akımda, gerilimde meydana gelen bozulmalar son kullanıcılar için ciddi önem arz etmektedir. Bu tür etkileri ortadan kaldırmak veya azaltmak için kompanzasyon sistemleri kullanılır. Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör aşırı gerilim ve reaktif güç kompanzasyonu için uygun bir güç sistemi ekipmanıdır [1],[2]. Güç sisteminin iletim kayıpları üzerinde ciddi rol oynar ve iletim hattında oluşan kapasitif etkileri yok etmek için ayarlanabilir kapasitesiyle vazgeçilmez bir ürün haline gelmiştir.

Modern Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörlerin altında yatan çalışma prensibi olan çeliğin manyetik doygunluğunun kullanımına ilişkin ilk fikirler 1940'larda ortaya

çıkmiştir. 1950'lerden itibaren bu fikirler daha da gelişmiş ve kapsamlı pratik uygulamalar yapılmıştır. İngiltere tarafından farklı ülkelerin elektrik şebekelerine birkaç ila yüzlerce MVAR birim kapasiteli 50'den fazla reaktör kuruldu. Ancak bu reaktörlerin teknik ve ekonomik performansı optimal olmaktan uzaktı ve yüksek malzeme maliyeti, düşük hız, sınırlı kontrol aralığı, yüksek kayıplar nedeniyle üretimi durduruldu. 1971'de yapılan çalışmalar modern üç fazlı MCR alt yapısını oluşturdu. 1980'lerde SSCB'de prototipler geliştirildi ve araştırıldı. 1990-1992 yıllarında tüm Sovyet Elektroteknik Enstitüsü'nün katılımıyla Za Porozhye trafo fabrikasında tam ölçekli bir 500 kV 60 MVAR tek fazlı MCR inşa edildi ve Moskova yakınlarındaki yüksek voltajlı bir test tesisinde başarıyla test edildi. 1990'ların sonundan 2003'e kadar olan dönemde 110, 220 ve 330 kV gerilim sınıfları için sırasıyla 25, 100 ve 180 MVAR birim nominal kapasiteli birkaç MCR tasarlanmış ve üretilmiştir. 2005 yılında 3 adet tek fazlı 60 MVAR ünitelerden oluşan ilk ticari 500 kV MCR devreye alındı. 2009'da ilk üç fazlı 180 MVAR ünitesi devreye alındı. 2014 yılına kadar dünya çapında MCR kurulu güç değeri 4000 MVAR değerine ulaşmıştır. 2014 yılından sonra daha da yaygınlaşmaya başlamıştır [3].

Bu çalışmada Bölüm 1'de Manyetik Kontrollü reaktörler ve yapısı hakkında bilgi verilmiş, reaktif güç kavramı açıklanmış, Literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bölüm 2'de Manyetik Kontrollü Reaktör Tasarımı ve Analizi gerçekleştirilmiş, adımlar açıklanmıştır.

Bölüm 3'de ise analiz sonuçları verilmiş ve tartışılmıştır.

Bölüm 4'de ise analizi ve teorik hesapları yorumlanan, üretiminin yapılmasına engel kalmayan reaktör için üretim adımları incelenmiş ve test verileri yorumlanmıştır.

Bölüm 5'de ise sonuçlar genel hatlarıyla verilmiş ve gelecekte yapılacak çalışmalara önerilerde bulunulmuştur.

1.1. Çalışmanın Amacı

Manyetik Kontrollü Reaktör güç sisteminde iletim, dağıtım kayıplarının azaltılmasında ve koordinasyonunda ciddi rol oynar. Hatta oluşan kapasitif etkileri yok etmek için ayarlanabilir kapasitesiyle vazgeçilmez bir üründür.

Bu çalışmada ülkemizde ve dünyada son yıllarda kullanımı artan, dağıtım şirketleri tarafından talep gören, Kontrollü Reaktörlerin yapısının daha etkin bir şekilde

anlaşılması, elektromanyetik yapısının incelenmesi ve enerji kalitesindeki rolü üzerinde durulmuştur.

1.2. Çalışmanın Kapsamı

Çalışmada Manyetik Kontrollü Reaktör çeşitli yönleriyle ele alınmıştır. Yapılan çalışmalar;

- Teknik ve ekonomik açıdan en uygun reaktör tasarımı yapılması ve üretiminin gerçekleştirilmesi,
- Teorik olarak tasarımı yapılan reaktör için Ansys-Maxwell programında gerçeğe en yakın model oluşturulması,
- Kayıplar üzerine elektromanyetik analizler yapılması ve test ortamında tekrarlanması,
- Reaktör için harmonik inceleme yapılması ve benzer ürünler ile karşılaştırılması,
- Reaktif güç değişimine verdiği tepki hızı üzerinde çalışılması,
- Aynı işi yapan diğer ürünler ile teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılması,

şeklinde sıralanabilir.

1.3. Literatür Özeti

Bu kısımda literatürde bulunan Manyetik Kontrollü Reaktör ve sonlu elemanlar yöntemi üzerine yapılan çalışmaların genel değerlendirilmesi yapılmıştır. Araştırmalar reaktör ailesinden Manyetik Kontrollü Reaktöre talebin daha fazla artacağını göstermiştir. Dolayısıyla tez çalışmasında Manyetik Kontrollü Reaktör tasarımı ve genel parametreleri üzerinde durulmuştur.

Xiaodong Zhang, Bo Lv, Tong Qu, Haiting Zhang, Yunfei ve Xiaoting Ma [1], güç sistemi uygulamalarında MCSR prensibini tanıtmaktadırlar. Fabrikalarda önemli bir test olan sıcaklık artış testi üzerine PSCAD ile bir yaklaşım önermiş ve testlerle etkinliğini ispatlamışlardır.

Li Tong, Caifei Hu, Xiaohui Li, Xueliang Fan ve Liqun He [2], dağıtılmış manyetik valfli MCSR önermişlerdir. Tek kademeli, çok kademeli ve dağıtılmış boşluklu nüve yapısına sahip reaktörleri incelemişlerdir.

Tao Zheng ve Kai Yu [3], Manyetik Kontrollü Reaktörün sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü üzerine çalışmışlardır. Teorik çalışma üzerine protatip ürün oluşturmuşlardır. Oluşturulan ürün daha çok yüksek gerilim seviyelerinde kullanılan MCSR yapısına uygundur.

Mingzhen Yang, Baichao Chen, Cuihua Tian, Fuzhang Wu ve Ziyu Guo [4], Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör nüvesindeki boşlukların koordinasyonu ile reaktör akımının harmonikleri arasındaki ilişki üzerine çalışma yapmışlar, harmonik eliminasyonu için yeni bir yöntem ortaya koymuşlardır.

Liang Yan-ping, Zhang Fang, Zhang Hai-ting ve An Zhen [5], Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörün yapısı ve çalışma prensibi üzerinde durmuşlar, matematiksel modelini elde etmişlerdir. Elde edilen matematiksel model sonucunda Matlab-Simulink kullanarak reaktörü modellemişlerdir. Kaçak endüktans hesabı için FEM yöntemini kullanmışlardır.

Boris V. Oleksyuk, Vladimir N. Tulsy ve Stefan Palis [6], bu çalışmada yüksek voltajlı elektrik şebekelerinde manyetik olarak kontrol edilen şönt reaktörlerin çalışması ve bunların akım, voltaj harmoniklerinin kaynağı üzerinde çalışma yapmışlardır. Manyetik Kontrollü Reaktörün simülasyon modelini geliştirmişler ve saha test sonuçlarıyla doğrulamışlardır. Gerilim dalgasının bozulması üzerine ana faktörleri incelemişlerdir.

Xiangzheng Xu [7], elektromanyetik alanın temel teorisine dayalı olarak manyetik olarak kontrol edilen bir reaktörün güç kaybını analiz etmişlerdir. Çeşitli manyetik valf yapısı modellerinde, reaktörün fiziksel simülasyon modellerini oluşturmuşlardır. Çekirdek yapısının sargı girdap akımlarında etkisinin olduğunu görmüşlerdir.

Ricardo Manuel Arias Velasquez ve Jennifer Vanessa Mejia Lara [8], zayıf bir güç sistemi için MCSR tasarımı gerçekleştirmişlerdir.

Xiangzheng Xu [9], bu çalışmada elektromanyetik alanın temel teorisine dayalı olarak manyetik olarak kontrol edilen bir reaktörün güç kaybını analiz etmektedir. Çeşitli manyetik valf yapısı modellerinde, reaktörün fiziksel simülasyon modelleri oluşturulur. Ansys-Maxwell simülasyon yazılımı kullanılarak, reaktörün çeşitli manyetik valf yapıları, manyetik valf tipi reaktör çekirdeği ve bobin güç kaybının analizi ile incelenmiştir.

Kashif Mehmood, Khaild Mehmood Cheema, Muhammad Faizan Tahir, Adeel Saleem ve Ahmad H. Milyani [10], manyetik kontrollü reaktör üzerine kapsamlı bir inceleme yapmışlardır. Manyetik kontrollü reaktörü modellemişler ve gelecek beklentileri üzerine çalışmışlardır.

Nisha Jenipher R., K.R.M. Vijaya Chandrakala [11], bu çalışmada manyetik kontrollü reaktör özellikleri anlatılmış ve TCR ile harmonik, gerilim profili üzerinde karşılaştırma yapılmıştır.

Romualds Bogdanovics, Maria Makarova [12], bu çalışmada tek sargılı manyetik kontrollü reaktörlerin ikili modelini sunmuştur. Tristör kontrollü reaktör olarak MCSR ikili şema oluşturma ilkeleri açıklamıştır. MCSR ve dual modelinin modellemesi yapılmıştır. Modelleme sonucu karşılaştırılmış ve harmonik analiz yapılmıştır.

Junqiang Xing, Yunshuo Zhang, Gong Chen, Wendi Yu, Zhuwen Dai [13], bu çalışmada yüksek gerilim seviyelerinde kullanılan sekiz bacaklı manyetik kontrollü reaktör üzerinde durulmuştur. MCSR'ün doğrudan enerjilendirme ve ön uyarım enerjilendirmesi sırasında çalışma özelliklerini doğrulamak için parite ilkesine dayalı bir elektromanyetik geçici simülasyon modeli kurulmuştur. Ön uyarım kapasitesinin ve hedef kapasitesinin MCSR'nin çıkış özellikleri üzerindeki etkisi araştırılır.

Tao Zheng, Xiaoxiao Liu [14], MCSR'ün geçici güç düzenleme sürecinin analizine ve bunun, dönüşten dönüş arızaya karşı toplam kontrol akımının temel bileşenine dayalı koruma üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. MCSR'nin kararlı durum özelliği analiz edilir ve manyetik doygunluk derecesi kavramı tanıtılır. Güç düzenlemenin geçici süreci teori ve simülasyon aracılığıyla analiz edilir. Öneriler simülasyon ile doğrulanmıştır.

Torbjörn Wass, Sven Hörnfeldt ve Stefan Valdemarsson [15], MCSR'nin tasarımının fizibilitesi üzerinde durulmuştur. Akı yönü dik olan kontrollü reaktör tasarımı yapılmıştır.

Tao Zheng, Ting Huang, Fenfen Zhang, Yanjie Zhao, Lianguang Liu [16], bu çalışmada manyetik kontrollü reaktörü enerjilendirmek için yeni bir yöntem önerilmiştir. Bir MCSR'nin yapısı ve çalışma ilkeleri kullanılarak, hem doğrultucudan hem de önceden uyarmalı enerjilendirme için enerjilendirme geçici matematiksel modelinin ayrıntılı bir türevi sunulmuştur.

Boris Bazilev, Victor Bepalov, Svetlana Dyagileva, Petr Makarov, Maria Makarova ve Boris Oleksyuk [17], Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörlerin bir ağ elemanı olarak mevcut yazılımlar ile matematiksel olarak modellenmesinin güncelliği makalede gösterilmektedir. Mevcut sistemlerden de örnekler yapılmıştır.

Tevik Vardar, Ertuğrul Çam ve Enes Yalçın [18], bu çalışmada, genel olarak enerji verimliliğinin ne olduğu ve elektrik enerjisinde verimliliğin hangi alanlara uygulandığı anlatıldıktan sonra enerji verimliliği sonucunda elde edilecek tasarruflar, güç katsayısı anlatılmıştır. Sonrasında ise piyasadan örnekler verilmiştir.

Süleyman Adak, Hasan Cangı, Ahmet Serdar Yılmaz [19], bu çalışmada altı darbeli kontrolsüz doğrultucunun oluşturduğu harmonik bileşenlerinin elimine edilmesinden ve harmoniklerin sisteme verdiği zararlardan bahsedilmiştir. Matlab/Simulink programı kullanılarak üç fazlı gerilim kaynağı, güç trafosu, altı darbeli kontrolsüz doğrultucu, pasif filtre ve R-L endüktif yükünden oluşan sistem modellenmesi yapılmış, analiz edilmiştir.

Ahmet Yiğit Akbulut, Emre Kurt, Fatma Keskin Akbulut, İbrahim Şenol [20], bu çalışmada, nüvesindeki hava aralıkları eşit ama sayısı farklı yapılmış olan üç adet çalışma incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda en uygun reaktör yapısı tespit edilmiştir. Tespit için sonlu elemanlar yöntemini baz alan Ansys-Maxwell programı kullanılmıştır.

Özgür Gencer, Nuran Yörükeren, Ayhan Malkoç, Hakan Kartal [21], bu çalışmada, OG sistemlerinde kullanılan MCSR ve TCR incelenmiştir. Bu inceleme hazır kurulu bir tesis üzerinde yapılmıştır.

R.R. Karymov, M.Ebadian [22], bu çalışmada MCR ile ilgili bir çalışma sunulmaktadır. TCR ve MCR arasında harmonikler açısından karşılaştırma yapılmış ve reaktör modeli kullanılmıştır.

S.J.Cheng, O.P. Malik, G.S. Hope [23], bu çalışmada gerçek zamanlı reaktif güç ve gerilim kontrolü için kontrollü bir uzman sistem geliştirilmiştir. Bu sistemin amacı olağanüstü durumlarda operatörün sisteme en uygun müdahaleyi gerçekleştirmesi için yardımcı olmasıdır. Gerilim problemini hafifletmek için gereken kontrol tedbirleri kapasitör kompanzasyonu, trafo kademesi ve jeneratör terminali gerilim değişiklikleridir. Tüm sistemde bara gerilimleri limitler dahilinde tutulursa sistem

güvenliği artırılır. Sistem PROLOG dilinde yazılmıştır ve 30 baralı bir güç sisteminde uygulanan simülasyon çalışmaları tatmin edici sonuçlar vermiştir.

S.K.Jain, Pramod Agarwal [24], bu çalışmada, harmonikler ve doğrusal olmayan yüklerin reaktif güç ihtiyacını telafi etmek için 3 fazlı bir şönt aktif güç filtresinin tam tasarımını, simülasyonunu ve deneysel araştırmalarını sunmaktadır. Çalışmada güç devresi elemanlarının ve kontrol devresi parametrelerinin tüm tasarım yönleri açıklanmaktadır. Kompanzasyon işlemi, yükün harmoniklerini ve reaktif volt-amper ihtiyacını gerektiren geleneksel yöntemlerden farklı bir yaklaşım olan, yalnızca hat akımlarının algılanmasına dayanmaktadır. Tasarımı doğrulamak amacıyla kararlı durum ve geçici koşullar sırasındaki performansı incelemek için çeşitli simülasyon sonuçları sunulmaktadır.

Liming Liu, Hui Li, Wenxin Liu [25], bu çalışmada, kademeli çok seviyeli dönüştürücü yapısı, modülerliği, ölçeklenebilirliği ve dağıtılmış maksimum güç noktası takibi sayesinde yüksek güçlü güneş fotovoltaik (PV) sistemleri için cazip olabilir. Ancak kademeli bireysel PV dönüştürücü modüllerinden kaynaklanan güç uyumsuzluğu, voltaj ve sistem çalışması sorunlarına neden olabilir. Bu makale bu sorunları ele almakta, reaktif güç kompanzasyonu ve optimizasyonunun sistem güvenilirliği ve güç kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmakta, bu sorunu aşmak için koordineli aktif-reaktif güç dağıtımını önerilmektedir. Güç dağıtım ilkesini göstermek için ilk olarak bir vektör yöntemi geliştirildi. Buna göre güç ve gerilim arasındaki ilişki geniş bir çalışma aralığı ile analiz edilmektedir. Daha sonra, sistemin çalışma kararlılığını ve güvenilirliğini geliştirmek, her dönüştürücü modül için aynı anda MPPT uygulamasını kolaylaştırmak için optimize edilmiş bir reaktif güç dengeleme algoritması önerilmiştir.

Z.H.Rather, Z.Chen, P.Lund [26], geleneksel enerji santrallerinin rüzgar türbinleriyle giderek yer değiştirmesi nedeniyle, büyük ölçekli rüzgarla entegre güç sistemlerinin dinamik güvenliği önemli ölçüde tehlikeye atılıyor. Bu yazıda ilk olarak, geleneksel enerji santrallerinin en az olduğu büyük ölçekli rüzgâr entegre güç sistemlerinde dinamik reaktif güç desteği/gerilim güvenliğinin önemini vurguluyor. Daha sonra, büyük ölçekli rüzgâr entegre güç sistemlerinde optimal dinamik reaktif güç tahsisi için karma tamsayı dinamik optimizasyona dayalı bir yöntem öneriliyor. Önerilen metroloji büyük ölçekli rüzgâr entegrasyonu ve en az merkezi enerji santrali varlığı ile karakterize edilen Batı Danimarka enerji sisteminin ayrıntılı modeline uygulanmıştır.

M.Tümay, T.Demirdelen, S.Bal, R.İ.Kayaalp, B.Doğru, M.Aksoy [27], yenilenebilir enerji kaynakları Dünya’da yaygın olarak mevcuttur; dolayısıyla hem araştırma hem de pratik uygulamalarda büyük ilgi gördüler. Büyük ölçekli yenilenebilir enerji sistemlerinde, şebekeye giren güç kalitesi, özellikle harmonikler ve titreşimler şebeke sistemini önemli ölçüde etkilemektedir. Son yıllarda, son kullanıcı ekipmanında meydana gelen arıza veya arızalardan kaynaklanan güç kalitesi sorunlarını çözmek için MCSR’ler yaygın olarak kullanılmaktadır. MCSR yüksek voltajlı güç şebekesinde sistem reaktif güç ve voltaj kontrolünü basitleştirebilir, güç frekansını ve aşırı voltajda çalışmayı bastırabilir, jeneratörün kendi kendini uyarılmasını ortadan kaldırabilir, bir iletim hattındaki gücün şarj edilmesini dinamik olarak telafi edebilir, ikinci ark akımını bastırabilir, sistemin çeşitli ihtiyaçlarını karşılayabilen sönümlenme sistemi rezonansı vb., gibi çok geniş bir uygulama beklentisine sahiptir. Bu makalede, MCSR konfigürasyonlarının, kontrol stratejilerinin, bileşenlerinin seçiminin, diğer ilgili ekonomik ve teknik hususların, bunların belirli uygulamalar için seçiminin kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Güç kalitesi sorunları ile ilgilenen araştırmacılara ve uygulama mühendislerine MCSR teknolojisinin durumu hakkında geniş bir bakış açısı sağlanması amaçlanmaktadır. Konuyla ilgili 130’den fazla araştırma yayınının bir listesi de hızlı bir referans olması açısından eklenmiştir.

1.4. Çalışmanın Gerçekçi Kısıtlar Açısından Analizi

Çalışmamızda 2 MVAr manyetik kontrollü şönt reaktör tasarımı üzerinde durulmuştur. Reaktörler transformatörler başlığı altında incelenmektedir. Transformatörler üzerinde literatürde sürdürülebilirlik açısından geçmişten bugüne belirli bir çizgide ilerleyen çalışmalarla doludur. Zaman ilerledikçe gelişen ve yeni keşfedilen parçalar sayesinde verim üzerinde iyileşme, bunun paralelinde maliyet açısından ucuzlama meydana gelmiştir. Bu gelişmeler sonucunda etrafa yayılan düşük frekanslı elektromanyetik dalgalar insan hayatı üzerinde ciddi rol oynamaya başlamıştır.

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. Nüvedeki boşluklara bağlı olarak reaktörün çektiği akımın harmonik içeriği değişmektedir.

TCR'lere kıyasla maliyet açısından daha düşüktür ve yüksek gerilim hatlarına direkt olarak bağlanabilirler. Güç sistemi kalitesi üzerine daha etkili rol oynarlar. Kullanılan güç elektroniği elemanlarının boyutları TCR'lere kıyasla daha küçüktür. Bu tipte kontrollü bir reaktör, anahtarlama gerilimini, devrenin kapasitif 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, kapasitör bankalarıyla paralel çalışarak, kapasitörlerin anahtarlanmasında kaynaklanan dezavantajları ortadan kaldırabilir. Bu şekilde kullanımı sayesinde, Tristör Kontrollü Reaktörün yanı sıra Tristör Kontrollü Seri Kompansatöre, Statik Var Kompansatör ve Statik Senkron Kompansatör ile rekabet etmektedir.

Harmonik optimizasyonu üzerinde varyasyonel yöntemi ve Gauss Legendre integrali kullanılarak, demir çekirdeğin şekillendirilmesiyle çalışmalar yapılmıştır. Reaktör nüvesi için akımın 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.

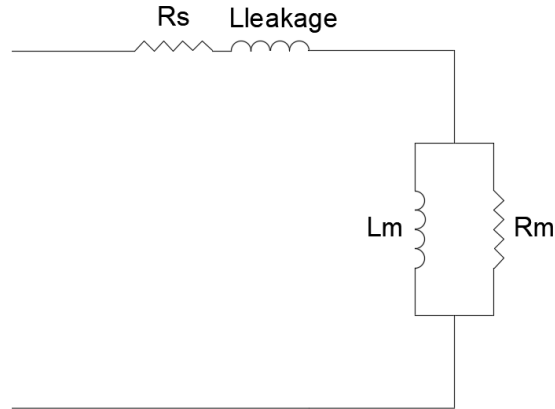
Çalışmamızda Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör üzerinde durulmuş, örnek bir reaktör tasarlanmış ve elektromanyetik analizleriyle birlikte üretilmiş, yorumlanmıştır.

2. MANYETİK KONTROLLÜ REAKTÖR TASARIMI VE ANALİZİ

Çalışmanın bu kısmında kullanılan yöntemlere ait bilgilendirmeye yer verilmiştir. Yöntem veya yöntemlerin problemin çözümünde kullanımı ve tasarım aşamaları da bu bölümde verilmiştir. Manyetik Kontrollü Reaktör Tasarımı ve Analizi gerçekleştirilmiştir.

2.1. Yöntem Hakkında Genel Bilgi

Reaktörler reaktif güç kontrolü için vazgeçilmez bir elektrik makinasıdır. Reaktörlerde sekonder sargı bulunmamaktadır. Çalışma prensibi transformatöre benzerdir [28,29,30]. Primer sargıdan indüklenen gerilim ile gerek hava boşluklarında, reaktörün tipine bağlı olarak gerekse nüvede biriken enerji sayesinde primer sargıdan endüktif akım akacaktır. Bu akım içerisinde kayıplar yüzünden düşük bir miktar da olsa omik akım bulunmaktadır. Şönt reaktörlerin eşdeğer devresi boşa çalışan klasik transformatöre benzerdir ve şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Reaktör eşdeğer devresi.

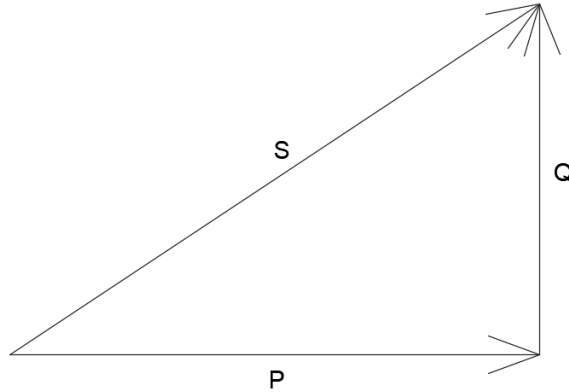
Şekilde gösterilen R_s sargı direncini, $L_{leakage}$ ise kaçak endüktans değerini, L_m nüve endüktansını, R_m nüve kayıplarını temsil etmektedir.

Sistemde reaktörler kapasitif etkiler sonucunda üretilen reaktif gücün ortadan kaldırılması için kullanılırlar. Kompanzasyon sistemlerinde vazgeçilmez elemandır. MCR'nin etkin bir şekilde çalışması için konumlandırılacağı nokta çok önemlidir, seçilen nokta tamamen sistem tasarımcısına bağlıdır [31].

Enerji sistemlerinde görünür güç, aktif ve reaktif olmak üzere iki çeşittir. Aktif güç tüketilen güçtür, reaktif güç ise arada gidip gelen harcanmayan gereksiz bir şekilde iletim hatlarında ekstra kayıplar oluşturan güçtür. Görünür güç S sembolü ile gösterilirken, aktif güç P, reaktif güç Q sembolü ile gösterilmektedir. Aktif güç görünür gücün reel bileşenini oluşturur, reaktif güç ise sanal bileşenini oluşturur. Görünür gücün formülü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$S = P + j Q \quad (2.1)$$

Bu formülden de anlaşılacağı gibi görünür güç vektörel şekilde de ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.2. Görünür güç vektörel gösterimi.

2.1.1. Şönt reaktörler

Elektrik güç sistemlerinde kompanzasyon için avantaj ve dezavantajlara sahip reaktör çeşitleri mevcuttur. Şönt reaktörler ise bunlardan bir tanesidir ve adından da anlaşılacağı üzere elektrik güç sistemine paralel bir şekilde bağlanırlar. Şönt reaktörler endüktif yük reaktörü olarak da adlandırılır. Üç veya tek fazlı, yağlı veya kuru tip, sabit veya değişken güçlü şekilde olmak üzere birden fazla opsiyonla üretilirler.

Demir çekirdekli şönt reaktörler sargı ve dağıtılmış boşluklu manyetik çekirdekli bir

yapıya sahiptirler. Boşluklarda depolanan enerji sayesinde sargıların endüktans değeri oluşmaktadır ve bu enerji değerine bağlı olarak endüktans değeri değişmektedir. Nüve, sargı ve ek kayıplar yüzünden az da olsa omik akım çekmektedir. Kapasitif etki altında olan hatlarda ve işletmelerde endüktif-kapasitif güç dengesini sağlamak için endüktif yük görevi görürler.

Kapasitif etkinin sebep olduğu başlıca sorunlar vardır. Bunlar;

- Ceza ödenmesi,
- Sistem içerisindeki cihazların ve sistemin ömrünün azalması,
- Hat boyunca iletilen aktif enerjinin azalması,
- Gereksiz yere bakım-onarım masraflarının ortaya çıkması,

şeklinde sıralanabilir .

Şönt reaktörler, DC sürücülerin ağırlıklı olduğu işletmelerde, uzun iletim hatlarından beslenen verici sistemlerde, yarı iletkenlerin yaygın kullanıldığı güç sistemlerinde, baz istasyonlarında, uzun kabloların kullanıldığı sistemlerde, hastaneler ve mağazalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sabit bir güç değerinin yanında boşta ve yükte ayarlanabilir güç kapasitesine sahip şekilde tasarlanabilirler. Boşta ayarlı şekilde yapılan tasarımlarda reaktör yüksüz durumdayken yani enerji kesilerek kademe değiştirilir. Yükte kademe değiştiriciye sahip reaktörlerde ise enerji kesilmesine gerek kalmadan gerekli güç kademesine getirilebilir. Bu ayarlı reaktörlerdeki ayar, belirli aralıklarda yapılır ve en büyük dezavantajlarından bir tanesi budur.

Şönt reaktörler;

- İletim ve dağıtım sistemlerde yüksek kapasitif etkiyi bastırmak için,
- Yüksek geçici gerilimleri engellemek için,
- Reaktif güç soğurucu olarak,
- Elektrik trafo merkezlerinde voltaj dengeleme ve güç faktörünün düzeltilmesi gibi durumlarda kullanılırlar.

2.1.2. Seri reaktörler

Seri reaktörler isminden de anlaşılacağı üzere hatta seri bir şekilde bağlanırlar. Seri reaktörler akım sınırlamada, gerilim ayarında, reaktif güç kompanzasyonu ve filtreleme amacı ile iletim ve dağıtım hatlarında kullanılırlar. Tasarım açısından incelenecek olursa seri reaktörlerin tasarımı oldukça zor ve zahmetlidir. Birden fazla bobinin paralel bağlanmasıyla oluştuğu durumlar mevcuttur. Bu paralel bağlantı

birbirleri arasında sirkülasyon akımı akmasına neden olur ve aktif kayıplar bu yüzden ısınmada meydana gelecek sorunlar için çok önemlidir. Reaktör talebinde bulunan müşteriler üreticiye öz indüktans, reaktör akımı, reaktör gerilimi, reaktörün frekansı, boyut sınırlarını, aktif güç kaybını, kısa devre akım ve süresi gibi taleplerini iletirler. Üretici iletilen bu talepler doğrultusunda en optimum tasarımını gerçekleştirir. Seri reaktörler çevreye ciddi miktarda manyetik alan yayarlar. Yayılan bu manyetik alan yüzünden yakın çevresine yani belirli bir uzaklığına kadar iletken bir malzeme koyulmaması önerilir. Tasarlanan seri reaktörün mekanik tutucularında bu duruma dikkat edilmektedir ve bu yüzden mekanik tasarım aşaması ciddi önem kazanmaktadır. Genel olarak seri reaktör alternatif akıma karşı direnç gösterir. Çok düşük bir iç direnç değerine sahiptirler. Akım akışını engellerken güç faktörü üzerinde herhangi bir etkiye sahip değildir. Seri reaktörlerin kullanımını aşağıda sıralanmıştır.

- Enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde arıza durumlarında yüksek akım akışını sınırlamak için,
- Yük paylaşımı için paralel şebekelerde,
- Empedans dengeleme amacıyla elektrik devrelerinde,
- Nötr topraklaması yapılacak sistemlerde topraklama amaçlı,
- Motorlarda yol verme sırasında yüksek akım geçişini engellemek için,
- Arıza sırasında yüksek kısa devre akım değerlerinin değerini azaltmak için alternatör paralel çalışmalarında,
- Harmonik ve geçici durumlarda arıza akımını sınırlamak için kullanılırlar.

2.1.3. Kontrollü reaktörler

Kontrollü reaktörler endüktans değeri sürekli olarak istenilen değerlere ayarlanabilen ayarlı reaktörlerdir. Bu ayar mekanizması fiziksel parçaların hareketliyle veya manyetik olarak meydana gelen değişikliklerle de yapılabilmektedir.

Kontrollü reaktörler, tristör kontrollü ve manyetik kontrollü olabilirler. Tristör kontrollü reaktörlerde, tristörler reaktöre seri bir şekilde bağlanarak, uygulanan gerilim ve akımın rms değerinin değiştirilmesiyle reaktif güç ayarlanır. Manyetik kontrollü reaktör ise manyetik yapıya uygulanan gerilimin değişmesiyle reaktördeki endüktans değişimi prensibine bağlı olarak çalışır. Bu endüktans değişimi açıklandığı gibi fiziksel hareketlerin yanı sıra dışardan uygulanan manyetik alanlar ile de sağlanır.

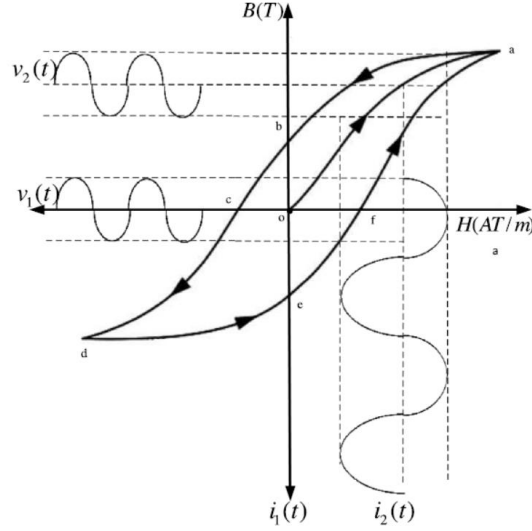
MCR'lere doğrultucu devre ile DC akım sağlayarak, nüve doyum seviyesine çekilmektedir.

MCR'ler, son yıllarda artan uygulama sayısı nedeniyle çok fazla önem kazanmaktadır. Rusya, Kazakistan, Moğolistan, birkaç Afrika lkesi, Brezilya ve Çin gibi doğu bölgelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

MCR gç derecelendirmesi, uygulamalarına bağlı olarak genellikle üç ve tek fazlı şekilde yapılır. 10 kVAr değerine kadar olan MCR tek fazlı olarak hastanelerde, ticari binalarda, yerleşim yerlerinde ve küçük sanayilerde kullanılırlar. Üç fazlı MCR, orta ve yüksek güç derecelendirme uygulamaları için kullanılabilir. Orta güç uygulamalarının nominal kapasitesi 10 kVAr ila 10 MVAR arasındadır. Uygulamaları reaktif güç kompanzasyonu, endüksiyon motorunun yumuşak yol vermesi ve gç sistemi salınımlarının sönümlenmesi olarak sıralanabilir.

MCR reaktif güç kompanzasyonu gç sisteminde endüktif yük üretimi arttığında, kapasitif etkilerden gerilim yükselmesi olduğunda, kaynak ile yük arasında bir reaktif güç dengesizliği olduğuunda, kapasitif reaktif güç kompanzasyonu için kullanılır.

MCR DC akımın uygulanmasıyla bobinin sarıldığı ferromanyetik çekirdeğin geçirgenliğinin değiştirilerek bobin reaktansının değiştirildiği bir cihazdır. DC sistem sayesinde bobinlerde DC akım akar ve bu DC akım nüvede DC akı oluşmasına neden olur. Aynı şekilde uygulanan AC voltaj nedeniyle sargılarda AC akım akışı meydana gelir ve bu akım sayesinde nüvede AC akı oluşur. Bu AC akı yarım periyot DC akı ile aynı yönde olurken diğer yarım periyot ters yöndedir. Bu etkileşim sayesinde endüktans değerini ayarlanır. AC akı değerinin doyum için ötelenmesini sağlayacak kadar amper sarım değerine sahip DC sargının bulunmasına tasarım aşamasında dikkat edilmelidir [27].



Şekil 2.3. Tipik bir histerezis döngüsü ve doyulabilir bir reaktörün amplifikasyon ilkesi [10].

o: BH eğrisinin başlangıç noktasıdır.

a: 'oa' bölümü, 0'dan $\pi/2$ 'ye pozitif AC döngüsü elde edilir.

Bu değer çekirdeğin maksimum doyma noktasıdır. Manyetik alan yoğunluğu 'B' ve manyetik alan şiddeti 'H' bu noktada maksimumdur. Dipol momentler, ferromanyetik malzemelerin manyetik alanında tamamen hizalanmıştır. Çekirdek bu noktada maksimum reaktif güç etkisini sergiler ve dolayısıyla alternatif akım, çekirdekteki sargılar tarafından sunulan minimum reaktansı alır.

b: 'ab' bölümü $\pi/2$ 'den π 'ye pozitif AC döngüsünde elde edilir. Manyetik alan şiddeti 0'dır ancak manyetik alan yoğunluğunun bu noktada B kalıntısı veya B_r olarak bilinen bir artık değeri vardır. b noktasından c noktasına kadar olan manyetik alan yoğunluğuna kalıcılık denir.

c: 'bc' bölümü, π 'den $3\pi/4$ 'e negatif AC döngüsünde elde edilir. Manyetik alan yoğunluğu sıfırdır ve manyetik alan şiddeti bu noktada H zorlayıcılık veya ' H_c ' olarak bilinen bir değere sahiptir. o noktasından c noktasına kadar olan manyetik alan şiddetine zorlayıcılık denir. Bu noktada çekirdek manyetizmasını kaybeder.

d: 'cd' bölümü, π 'den $3\pi/4$ 'e negatif AC döngüsünde elde edilir. Manyetik alan yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti bu noktada negatif maksimumdur. Dipol momentler, ferromanyetik malzemelerin manyetik alanında ters yönde hizalanır. Çekirdek bu noktada minimum reaktansı sergiler.

e: 'de' bölümü $3\pi/4$ 'ten 2π 'ye negatif AC dögüsünde elde edilir. AC dögü bu noktada tamamlanır.

f: 'ef' bölümü, 0'dan $\pi/2$ 'ye pozitif AC dögüsünde elde edilir. Manyetik alan yoğunluğu yine sıfır ve manyetik alan şiddeti bu noktada sıfır olmayan bir değer sergiler.

a: 'fa' bölümü, 0'dan $\pi/2$ 'ye pozitif AC dögüsünde elde edilir. Manyetik alan yoğunluğu 'B' ve Manyetik alan şiddeti 'H' bu noktada yine maksimumdur ve dolayısıyla histerezis dögüsü 1,25AC dögüde tamamlanır.

Böylece DC gerilim uygulanması sayesinde reaktörün BH eğrisi üzerindeki çalışma noktası değiştirilebilir. Bu değişken çalışma noktası, çekirdeğin değişken endüktansı veya reaktansına izin verir ve MCR'nin reaktif güç kompanzasyonunu belirler.

Normalde harmonik içermeyen sistemlerde akım ve gerilim dalga şekilleri saf sinüzoidaldir. Sistemde lineer olmayan yükler bulunuyorsa bu dalga şekilleri saf sinüs değildir. Dalga şekillerinin bozulmasıyla sistem kayıplarının artması ve rezonans olayları meydana gelebilir. Bu kayıplar ve rezonans olayı tüketici ekipmanlarına, dağıtım sistemi ekipmanlarına zarar verebilir. Tüm bu nedenlerden dolayı harmonik kompanzasyonu güç sistemleri için en kritik olaydır. MCR gerilim ve akım harmoniklerinin elimine edilmesi için yaygın olarak kullanılan ekipmanlar arasındadır. MCR'ler kullanılarak çoklu kompanzasyon sistemleri yapılmaktadır. Bu çoklu sistemin amacı harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu gibi birden fazla sistem faktörünü aynı anda telafi etmektir. Böyle bir sistem karmaşık bir yapıya sahiptir ve karmaşıklığın yanı sıra çok daha etkili, kapsamlı kompanzasyon sağlamaktadır. Güç kalitesinin artması için çok fonksiyonlu bir cihaz olduğu görölmektedir [32].



Şekil 2.4. MCR kullanım amaçları.

MCR, iletim sisteminin reaktif kapasitesini düzenlemeye yarayan çok yönlü bir AC iletim cihaz türüdür. MCR'nin analizi çok önemli bir faktördür, son yıllarda bilim

adamları farklı bakış açılarıyla MCR çalışmaları yapmışlardır. MCR yaklaşık eşdeğer devre üzerinden analiz edilir ve bunun başlıca nedeni karmaşık olan elektriksel yapısıdır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analizlerin yapılması ve matematiksel problemin çözümünü kolaylaştırılmak için yaklaşık eşdeğer elektromanyetik model kullanılır.

MCR kontrol yöntemine göre açık çevrim kontrol, kapalı çevrim kontrol olarak sınıflandırılabilir [33]. Açık çevrim kontrol sisteminde, çıkıştan geri besleme alınmaz. Bozucu etkiler sistem tarafından belirlenemez bu nedenle, bu tip kontrol sistemi yapısı ve değişkenleri çok iyi bilinen, hassas olmayan sistemlerde tercih edilir. Güç sistemi gibi çok değişkenli sistemlerde kullanılması sağlıklı olmaz.

Kapalı çevrim kontrol sistemi, çıkıştan geri besleme alınan sistemdir. Bozucu etkiler sistem tarafından belirlenebilir ve sistemde hassas bir kontrol mekanizması sağlanmış olur. MCR sistemlerinde kapalı çevrim sık kullanılan bir kontrol yöntemidir. Kapalı çevrimde model ölçme devresi, PID devresi, sinyal devresi, faz kaydırma devresi, karşılaştırma devresi, senkronizasyon cihazı ve sürücü devresinden oluşur [34].

MCR, TCR ile aynı kontrol çevrimini kullanabilir. Böyle bir kontrol yönteminde, uygulamada kullanılan kapalı çevrimde doyum derecesi üzerinden geri besleme alınır, böylece çıkış gerilimi ve reaktif güç değeri ayarlanabilir [32].

MCR kontrolü PLC ve FPGA ile sağlanır. İlk tetikleme açısı PLC tarafından üretilir. FPGA ise 60°'lik zaman gecikmesi ile diğer 5 tetikleme sinyalini üretir. MCR altı tetikleme sinyali ile sürülür [35].

Optimizasyon, mevcut süreci en az kayıp ve en fazla verimle yönetmektir. Birçok alanda olduğu gibi güç sistemlerinde de verimi arttırmak için optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. MCR'lerde harmoniklerin optimizasyonu için yıllarca çeşitli uygulamalar ve algoritmalar uygulanmıştır. PSO algoritması akım harmoniğinin minimizasyonu için kullanılan örnek algoritma olarak verilebilir [40].

Yeni ortaya atılan kontrol algoritmaları ile yapılan optimizasyon çalışmaları da literatürde mevcuttur. MCR için kullanılan optimizasyon algoritmaları arasında bal arısı çiftleşme optimizasyon algoritmasının kullanıldığı görülmüştür. MCR için DC-DC ve PID kontrolörden oluşan bir kontrol sistemi de kullanılabilir. Bu kapalı çevrim sistemde PID Self Tuning Algoritması kullanılır. Bu algoritma ve kontrol sayesinde MCR tepki süresi iyileştirilir, salınım azaltılır ve yumuşak bir kontrol sağlanır [36].

MCR tepki süresini azaltmak için ve aşırı kompanzasyonun önüne geçmek adına yeni bir algoritma önerilmiştir. Ani reaktif güç teorisine ve Steinmetz algoritmasına dayalı bir kontrol algoritması geliştirilir, hat geriliminin pozitif dizi bileşeni Clark dönüşümü kullanılarak iki fazlı statik koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Clark ve aprk dönüşümleriyle yük akımının pozitif bileşeni DC bileşene, negatif bileşeni AC bileşene dönüştürülür [37].

MCR'nin EHV ve UHV uygulamalarında, kontrol için bir uyarlanabilir izleme algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ile iletim kaybı minimize edilir, aşırı gerilimler azaltılır, tepki süresi kısalmır ve harmonik içeriği azalır. Kontrol sisteminde faz ölçüm yönteminde Fourier dönüşümlerinden yararlanılmıştır.

Değişken alternatif akım sistemlerinde üretilen harmoniği azaltmak için yüksek gerilimde kullanılan MCR'lerde topoloji olarak değişiklik yapılarak, kontrol tarafına eklenen harmonik sönümlenme sargısı, harmoniği azaltır ve tepki süresini kısalmır [38].

MCR için kontrol devresinde de değişiklik yapılarak tepki süresi kısalmır. Bunun en basit örneği kontrol sisteminin IGBT tabanlı yapılarak hızlı ikaz ve hızlı demanyetizasyon sağlanmasıdır [39].

Kontrol sargılarının üçgen bağlı olduğu durumlarda sıfır dizi harmoniklere akış yolu oluşturulur. Harmonik eliminasyonu için diğer bir yöntemde ise her primer sargısına harmonik kompanzasyon sargısı eklenir. Sekonder kontrol sargıları bir buck devresi ile gerilim kaynaklı inverterin doğru akım tarafındaki kapasitöre bağlanır.

Ürünü aşırı gerilim ve harmoniklerden korumak için ön ikaz sistemi kullanılabilir.

Gerilim tipi bir PWM dönüştürücü kullanılarak MCR'de hızlı tepki elde edilebilir. PWM sisteminde hızlı tepkinin en önemli kaynağı DA kontrol stratejisidir.

MCR ve kesicinin eş zamanlı kontrol sinyali ile çalışma durumlarında kesicinin devreye alınmasından kaynaklanan aşırı gerilimler azaltılabilir [40].

2.1.4. Reaktör kayıpları

Reaktörlerde kayıplar nüve, sargı ve ek kayıplar olmak üzere üç başlık altında incelenebilir.

2.1.4.1. Nüve kayıpları

Demir Çekirdekli Reaktörlerin nüvesinde depolanan akıdan dolayı nüvede kayıplar meydana gelir. Reaktör yapısına ve çeşidine bağlı olarak nüvenin doyumda çalışma durumlarına rastlanabilir ama standart şönt reaktörlerde böyle bir durum istenmemektedir. MCR'nin çalışma prensibi nüve doyum mantığına dayanır. Nüve kayıpları nüve malzemesine bağlı olarak değişmektedir ve genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{Nüve} = P_h + P_e \quad (2.2)$$

$$P_h = k_h * f * B_{mak}^x \quad (2.3)$$

$$P_e = k_e * f^2 * B_{mak}^2 * t^2 * V \quad (2.4)$$

h: Histerisiz parametresi

e: Eddy parametresi

Burada x üssüne steinmetz sabiti denir. Nüveye bağlı olarak 1,5-2,5 arasında değişir. t laminasyon kalınlığını ifade ederken V ise hacimi ifade eder. Histerisiz kayıpları B-H dönüşündeki şişmelerden, eddy kayıpları ise nüvede oluşan akıdan meydana gelir. Nüve kalınlığı azaltılarak eddy kayıplarında düşüşler sağlanabilir.

Reaktörlerde nüve kayıplarını standart testler ile tespit etmek zordur. Tespit edilmesi istenirse özel test yöntemi geliştirilmeli ya da teorik olarak yaklaşım yapılmalıdır.

Reaktörlerde ayrıca saçaklanan akılar ekstra kayıplar oluşturabilir. Bu kayıpların optimizasyonu önemlidir. Bunun için çeşitli ekranlama yöntemleri uygulanmaktadır.

2.1.4.2. Bakır kayıpları

Bakır kayıpları reaktör sargılarının DC ve AC kayıpları olmak üzere iki çeşittir. Bu kayıplar yüklenmeye göre değişiklik gösterir, bu yüzden değişken kayıplar olarak da bilinirler ve hesaplanması sargı şekline bağlı olarak zordur.

DC kayıplar DC dirençten kolayca hesaplanabilirken AC kayıplar için ampirik formüller ve FEM programları gerekmektedir. AC kayıplar sargılarda meydana gelen kaçak akılardan kaynaklanmaktadır. Bu kaçak alanın fazlalığı manyetik malzemelerde yüklenmeye bağlı olarak kayıp artışını oluşturur. Test verilerinden elde edilen AC kayıplar sadece sargıda oluşan kayıplar değil aynı zamanda yapısal parçalardaki kaçak akıdan kaynaklanan kayıpları da içermektedir. Kaçak kayıplar reaktörün kullanım ömrü üzerinde etkilidir.

Sargı iletkenleri gelen alanın iki bileşenine, yani aksel ve radyal akı yoğunluğu bileşenlerine tabidir. Tellere nüfuz eden bu alanın sonucunda sargıda eddy kayıpları oluşur. Analitik denklemlerle her bir telin metre küp başına watt cinsinden kayıp yoğunluğu aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$P_e = w^2 * t^2 * \frac{B^2}{24 * \rho} \quad (2.5)$$

Bir sonraki adım kayıp yoğunluğunu sargı hacmiyle çarparak kayıpları watt cinsinden elde etmektir. Bu işlem akı yoğunluğunun hacim üzerinde entegrasyonu ile de sağlanabilmektedir.

Aşağıda kayıp bileşenlerinin hem radyal hem de aksel bileşenler için sarım sayısının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu gösterimler her bir telin orta noktasında elde edilen alan miktarları kullanılarak sargı eddy kayıplarının hesaplanmasını gösterir.

$$P_{ea} = \frac{w^2 * t^2}{24 * \rho} * \sum_{na=1}^{naT} \sum_{nr=1}^{nrT} (B_a(nr, na))^2 V_s(nr, na) \quad (2.6)$$

$$P_{er} = \frac{w^2 * h^2}{24 * \rho} * \sum_{na=1}^{naT} \sum_{nr=1}^{nrT} (B_r(nr, na))^2 V_s(nr, na) \quad (2.7)$$

Yukardaki denklemlerden kayıpların yoğunluğunun akı yoğunluğu bileşeninin karesiyle orantılı olduğu açıkça gözükmektedir. Bu ilişki sargı yüksekliği boyunca aynı radyal konumda olan iletkenler için önemlidir. Bu teller boyutlarının aynı olması koşuluyla sargı yüksekliği boyunca aynı hacme sahip olacaktır. Buna ek olarak, çoğu pratik uygulamada sargıda aynı tel boyutları kullanılır.

Kayıpların doğru tahmin edilmesi için yerel akı yoğunluklarının doğru tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu tahmin aynı zamanda kaçak akıların doğru tespit edilmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

AC kayıplar sadece sargılarda meydana gelmez aynı zamanda kazanda, tutucu ve diğer mekanik parçalarda meydana gelebilir. Bu kayıplara ise ek kayıplar denilmektedir.

2.1.5. Reaktörlerde meydana gelen harmonikler

Dünya çapında meydana gelen yarı iletken artışına bağlı olarak elektrik sistemlerinde harmonikler artmıştır. Bu harmonik artışlarının en büyük nedeni ise sisteme bağlı olan yüklerin non-lineer oluşudur. Bu lineerlik veya non-lineerlik dirençte gerilim-akım, bobinde akım-akı, kondansatörde ise gerilim-yük ilişkilerine bağlı olarak değerlendirilir. Lineer olmayan yük elemanları sistemde böyle bir etkiye sebep olurlar.

Bu oluşan harmonikler yüklerde ve elektrik makinalarında ısınmayı beraberinde getirmektedir.

Manyetik Kontrollü Reaktörler ise akım ve gerilim harmoniklerinde rol oynamaktadırlar. Gerçek hayatta manyetik olarak kontrol edilen reaktörler üzerinde yapılan güç kalitesi ölçümleri, bu makinaların, elektrik şebekesine bağlantı noktalarında voltaj toplam harmonik distorsiyonunun izin verilen limitleri aşan harmonikler üretebildiği göstermektedir. MCR harmonikleri harmonik sıra ile azalarak gider ve genelde 9 ve üzeri harmonik dereceleri sistem analizlerinde dikkate alınmaz. Akım spektrumunun, harmonik akımların büyüklüklerinin harmonik sıra ile azaldığı tek harmonikler içerdiğine dikkat edilmelidir. MCR'nin sinüzoidal voltaj dalga biçiminin bozulması üzerindeki etkisinin ön değerlendirmesi için, kontrollü reaktörlerin katkısı, trafo merkezi baralarındaki arka plan ölçüm sonuçlarından ayrılmalıdır.

Gerçekte çalışan MCR'ler üzerinde deneyler yapmak hem teknik hem de organizasyonel açıdan karmaşık bir iştir, bu işlem gerilim seviyelerini, stabiliteyi ve aktif güç kayıplarını önemli ölçüde etkileyerek şebeke kontrolünü bozar. Gerilim dalga biçimi bozulması üzerindeki olası MCR etkisinin aralığının değerlendirilmesi sırasında bu olumsuz etkilerden kaçınmak için, uygun bir matematiksel model gereklidir. Böyle bir model, harmonik akım enjeksiyonu ve dış faktörlerin reaktör akım dalga biçimi üzerindeki olası etkisi açısından orijinal reaktörün davranışını yansıtmalıdır.

Mıknatıslanma akımına göre harmonik akımların karakteristiğinde 5. harmonik hakimdir. Mıknatıslanma akımının artmasıyla reaktör akımının THD'si azalmaktadır ve reaktör dengeye gelmektedir [21].

Gerilim seviyesine göre reaktörün bağlantı şekli değişmektedir. Yüksek gerilim seviyelerine çıktıkça reaktör bağlantısı yıldız olur. Yıldız bağlantı yapılması durumunda reaktör sargılarına ek kompanzasyon sistemleri bağlanması gerekebilir. 36 kV gerilim seviyesinde ise bu bağlantı şekli üçgen olarak tercih edilmektedir ve 3. harmonikler sargı içerisinde kalmaktadır.

MCR'nin nüve bacaklarında aynı zamanda harmonikli bir manyetik alan meydana gelir. Bu harmonikli alan yüksek frekanslı akı ve DC akı bileşenlerini içermektedir. Aşağıda sağ ve sol bacakta indüklenen akı yoğunlukları için bağıntılar verilmiştir.

$$B_L(t) = B_0 + B_1 * \sin(\omega t - Q_1) + B_2 * \sin(2\omega t - Q_2) + B_3 * \sin(3\omega t - Q_3) + \dots + B_n * \sin(n\omega t - Q_n) \quad (2.8)$$

Nüve bacakları arasında yarım dalga simetrisi mevcuttur ve B_R ifadesi şu şekildedir:

$$B_R(t) = -B_0 + B_1 * \sin(\omega t - Q_1) - B_2 * \sin(2\omega t - Q_2) + B_3 * \sin(3\omega t - Q_3) + \dots + B_n * \sin(n\omega t - Q_n) \quad (2.9)$$

Yukarıda verilen harmonikli endüksiyon bileşenleri MCR akımına da yansiyacaktır. Bunun sonucunda reaktör harmonikli akım çekecek ve gerilimde de bir bozulma meydana gelecektir. Bu harmonik içeriği reaktör nüvesinde boşlukların koordinasyonu ile çeşitlendirilebilmektedir ve ekstra kompanzasyon sistemine gerek duymadan çözülebilir.

2.1.6. Reaktörlerde soğutma

Reaktörlerde meydana gelen kayıplar ısıya dönüşmektedir ve bu ısı dışarı atılmaz ise ciddi termal sorunlar meydana gelir. Bu yüzden reaktörlerde bir soğutma sistemi veya yüzeyi bulunmak zorundadır. Genellikle en çok ısı üreten reaktör parçası, sargıdır. Bu yüzden sargı soğutması da ciddi önem arz etmektedir. Bu soğutma sistemleri doğal hava (ON), hava zorlamalı (AF), ONAN, ONAF, ONWF, OFWF şeklinde sınıflandırılır.

O : Yağ

N: Doğal

A: Hava

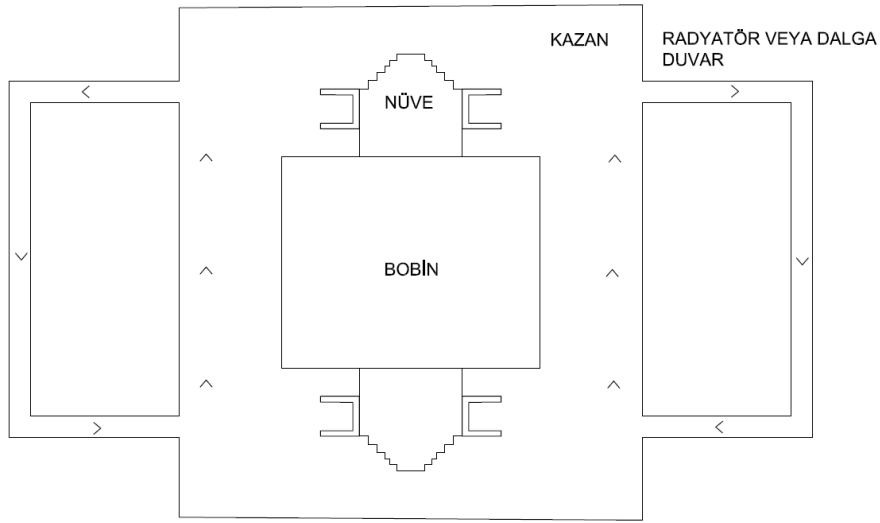
W: Su

F: Zorlama

Kuru tip olarak tasarlanan reaktörler ve transformatörler AN ve AF şeklinde soğutulurlar. Doğal hava yönteminde açığa çıkan ısı doğal havanın sirkülasyonu ile soğutulur. Yöntem kendi kendine soğuyan yöntem olarak bilinir ve güç aşımı olmayan sistemde kullanılabilir. Hava zorlamalı yöntem ise fanlar ve üfleyiciler yardımıyla sargılara hava gönderilir. Bu sayede güç artışı sağlanılarak reaktör veya transformatör kapasitesi üzerine çıkılabilir. Reaktörde bu güç artışı nüvenin lineerliğine göre sınırlandırılır.

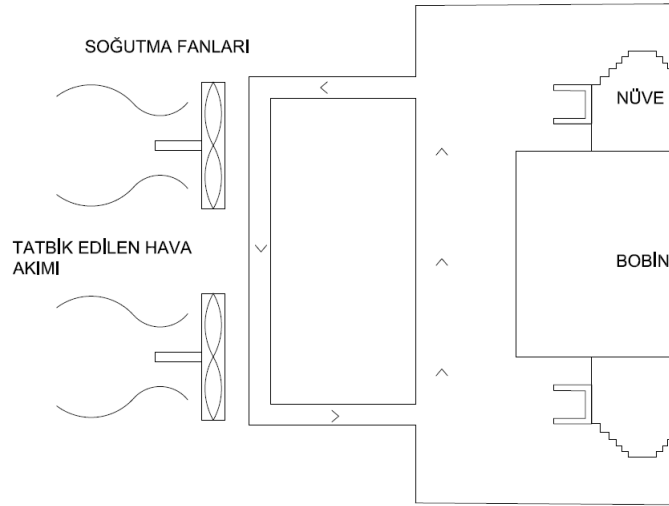
Yağlı tip trafolar da ise 30 MVA gücüne kadar ONAN, 60 MVA gücüne kadar ONAF, daha büyük güçlerde ise OFWF soğutma şekli kullanılır.

ONAN soğutma şekli için doğal konveksiyon işlemi kullanılır. Çekirdek ve sargılar yağla birlikte tanka yerleştirilir. Transformator ısındıkça yağ da ısınacaktır. Isınan bu yağ yukarıya doğru hareket eder ve reaktör tankının üst kısmından akar. Bu akış sayesinde yağ doğal konveksiyon ve iletim yoluyla ısıyı havaya dağıtır. Yağ doğal havanın dolaşımı ile soğur, reaktörün kullanımı için radyatörlerden geçer.



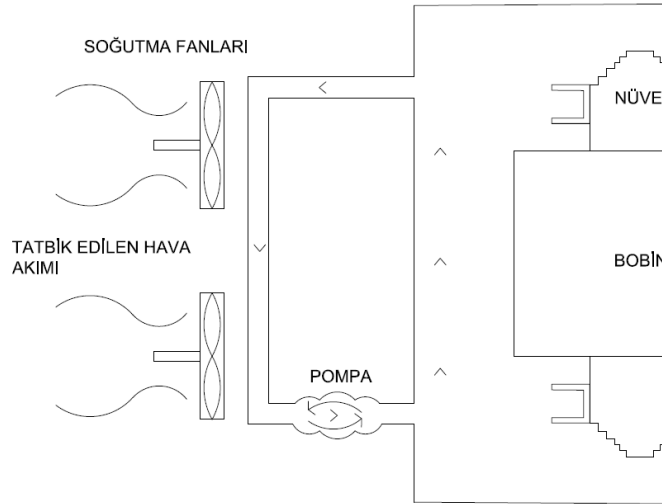
Şekil 2.5. Kazan içerisindeki yağın akış yönü.

ONAF soğutması, ONAN soğutmadan farklı olarak cebri hava trafo soğutması için kullanılır. Tank yüzey alanı arttırılırsa yağ daha hızlı soğuyacaktır. Radyatörler yüksek hızlı bir şekilde sürekli olarak hava uygular. Maliyeti kendi kendine soğuyan sistemlere göre daha yüksektir.



Şekil 2.6. Kazan içerisindeki yağın akış yönü ve havanın tatbik edilmesi.

OFAF soğutma sistemi, yağın ve havanın zorlamayla soğutmaya dahil edildiği sistemdir. Yağın kazan altına koyulan pompa ile sirkülasyonu desteklenerek soğutma için devir daim hızı artırılır. Radyatörlere ise fanlar ile dışardan hava üflenir. Bu sistemin maliyeti ONAN ve ONAF sistemlerden daha fazladır.



Şekil 2.7. OFAF soğutmalı reaktör.

ONWF sisteminde ise, tank dışına radyatör monte edilir. Sıcaklık yükselir, yağ ısınır ve yukarı doğru hareket eder, doğal konveksiyon işlemi ile ısı dağılır ve yağ radyatörden geçirilir.

OFWF ise, bir pompa yardımıyla hem suyun hem de yağın geçirildiği bir ısı eşanjörü kurulur. Yağ seviyesi ve basıncı suyunkinden daha yüksek tutulur. Bunun nedeni sistemde bir arıza olması durumunda yağ su ile karışabilir ama su yağ ile karışamaz. Genellikle bu tip soğutmaya sahip makineler hidroelektrik santrallerinde kullanılır.

2.1.7. Reaktörlerde kullanılan manyetik malzemeler

Üzerinden akım akan iletkenlerde manyetik alan meydana gelir. Manyetik alan şiddeti bu akan akım miktarına bağlı olarak değişir. Manyetik alan şiddeti basit bir şekilde her metreye düşen akım olarak literatürde ifade edilir. Manyetik akı yoğunluğu mevcut malzeme özelliklerine bağlı olarak belirli bir şiddette ortaya çıkar. Malzeme özellikleri değiştikçe bu alan şiddeti değişecektir. Simgesi B ve birimi **Weber/m²**'dir. SI birim sisteminde akı yoğunluğunun birimi Tesla olarak da geçmektedir. Manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu arasında aşağıda verilen ilişki vardır.

$$B = u * H \quad (2.10)$$

$$u = u_0 * u_r \quad (2.11)$$

Burada u_0 havanın manyetik geçirgenliğidir. Bir maddenin manyetik geçirgenliği boşluk ve bağıl manyetik geçirgenlik olarak sınıflandırılır, bunların çarpımına eşittir. u_r ise bağıl geçirgenliktir ve maddenin karakteristik özelliğine bağlıdır. Bağıl geçirgenliklerine göre manyetik malzemeler diyamanyetik, ferromanyetik ve paramanyetik malzemeler olarak üç sınıfa ayrılır.

Diyamanyetik malzeme, bağıl geçirgenliği 1'den küçük olan malzemedir. Manyetik alan ile etkileşime girdiklerinde tepkileri zayıf olmaktadır. Karbon, bakır ve gümüş bu malzemelere örnek olarak verilebilir.

Ferromanyetik malzemeler, bağıl geçirgenliği 1'den çok fazladır. Manyetik alan şiddetini çok arttırırlar ve bu nedenden dolayı nüve malzemesi olarak seçilebilir. Demir, nikel, kobalt bu malzemelere örnek olarak verilebilir.

Paramanyetik malzemeler, bağıl geçirgenliği 1'den büyüktür. Alüminyum bu malzemelere örnek olarak verilebilir.

Nüve malzemesi olarak kullanılan silisli sacların da çeşitleri mevcuttur ve farklı tepkiler verebilmektedir. Silisli sac olarak yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş saclar kullanılabilir. Yönlendirilmemiş saclar genelde elektrik motorlarında kullanılırken, yönlendirilmiş saclar ise transformatör, reaktör vb. gibi makinelerde kullanılırlar.

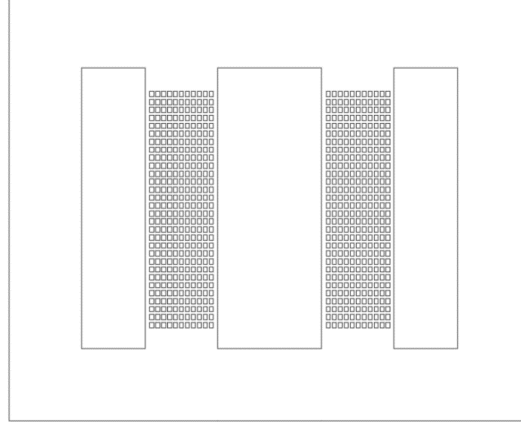
Nüve malzemesi tamamen tasarımcıya bağlıdır ayrıca malzemeye göre sac kalınlığı, kayıpları, ürünün ses seviyesi değişmektedir.

2.1.8. Reaktörlerde nüve kesit alanı

Reaktörlerde nüve hava aralığına sahiptir. Bu hava aralıkları nüvenin parçalı yapısı kullanılarak elde edilir. Oluşturulan bu hava aralıklarında enerji birikir ve bu hava aralığında biriken enerji sargı endüktansını oluşturur. Endüktans için nüvede kullanılan sac malzemenin manyetik karakteristiği yani bağlı geçirgenliği önemlidir. Kullanımına uygun nüve sacı seçilmelidir. Sacın birer yüzü yalıtkan bir tabakayla kaplıdır, bunun başlıca nedeni eddy kayıplarının oluşumuna neden olan eddy akımlarının yolunu sınırlamaktır. Yüksek güçlü reaktörlerde veya transformatörlerde nüve steplerine yağ kanalları açılmaktadır. Aşağıda reaktörler ve trafoların temel yasası olan Faraday yasası verilmiştir.

$$e = W \frac{dQ}{dt} \quad (2.12)$$

Verilen formülden de anlaşılacağı üzere nüvede meydana gelen akı uygulanan gerilime ve sarım sayısına bağlıdır. Nüvede değişken akının indüklenmesi için AC gerilime ihtiyaç duyulur. Nüve kalitesine göre meydana gelen kayıplar ve endüktans için gerekli kesit alanı değişecektir. Tüm bu sebeplerden dolayı nüve seçimi MCR için kilit noktadır. Çekirdek tip nüvelerde nüvenin kesiti dikdörtgen, kare veya basamaklı yapıya sahip olabilir. Güç değeri arttıkça genelde bobin yapısı dairesel şekle dönmektedir, dikdörtgen kesit genelde düşük güç ve düşük gerilim seviyesine sahip transformatörlerde ve reaktörlerde kullanılır. MCR'lerde kullanılan nüve şekil 8'de gösterilmektedir. Diğer demir çekirdekli reaktörlerden farklı nüve yapısına sahiptir. Bunun nedeni bölgesel doymaları oluşturarak nüve malzemesine bağlı endüktans değerinin oluşturmak istenmesidir.



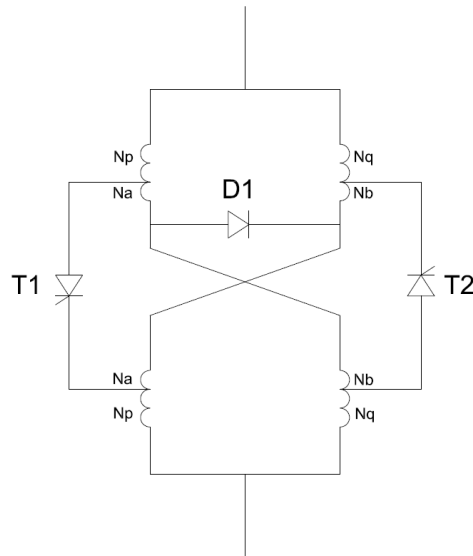
Şekil 2.8. MCR tek faz manyetik eşdeğer modeli.

Reaktör nüvesine uygulanan DC gerilim değeri tristör tetik açılarının azaltılmasıyla artacak, nüvede bölgesel doymalar meydana gelerek endüktans değeri düşecektir.

2.1.9. Manyetik kontrollü reaktör çalışma prensibi

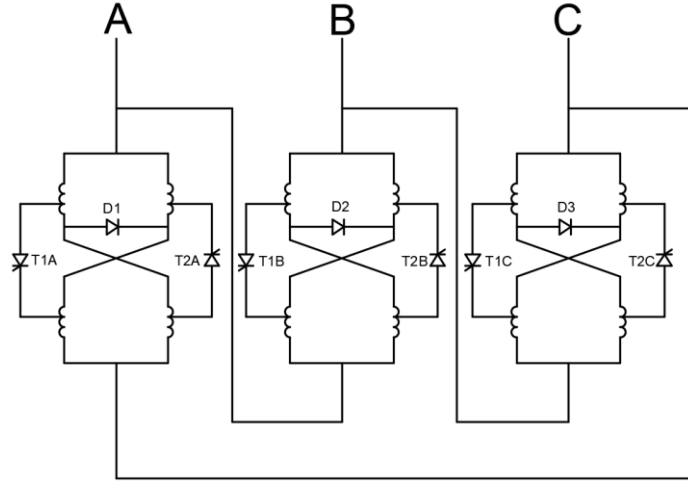
MCR'lerin yapısı normal transformatör yapısına çok benzerdir ve aktif kısım iki adet üç fazlı transformatörden oluşur. Bacaklarında hat sargısının yanı sıra kontrol sargısı da bulunur. Kontrol sargısı hat sargılarının belirli bir yüzdesini kapsayacak şekilde tasarlanır. Tek fazlı bağlantı şekli Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

MCR 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 sistemlerinde kullanılan Manyetik Kontrollü Reaktörde kontrol sargısı ve hat sargısı seri bağlıdır.



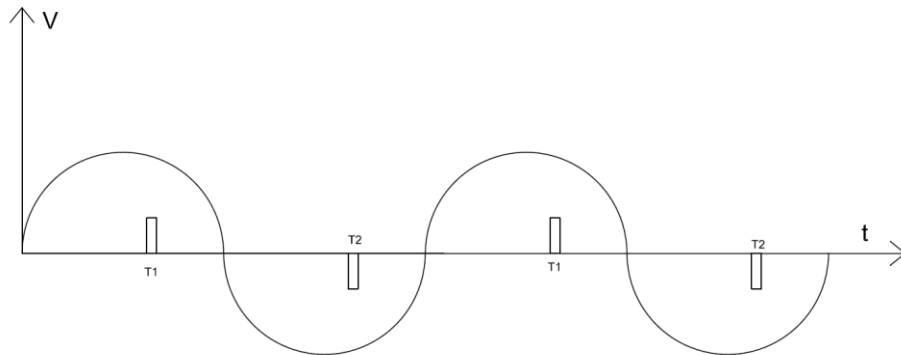
Şekil 2.9. MCR tek faz elektrik eşdeğer modeli.

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 2.10'dan görüleceği üzere üç fazlı bir MCR'de 6 adet tristör ve 3 adet diyot bulunur. Bu tristörlerin tetikleme açıları fazlar arası 120 derecedir.



Şekil 2.10. MCR üç faz elektrik eşdeğer modeli.

Reaktör sargılarına bağlı olan tristörlere tetik açısı uygulanmazken reaktör minimum reaktif güç seviyesi ve maksimum endüktans değerinde çalışacaktır. Tetik açıları düşmeye başladıkça reaktör nüvesinde DC akı değeri artmaya başlayacak ve reaktör endüktans değeri düşecektir. İstenilen güç değerine gelindiğinde reaktörü kontrol eden tristörlerin tetik açısı sabitlenecek reaktör sürekli rejim değerine gelecektir. Aşağıdaki şekilde reaktörün referans alınan fazı için iki periyotta meydana gelen tetik açıları örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11. MCR tristör tetik açıları.

2.1.10. MCR ve alternatif ürünler ile karşılaştırması

MCR herhangi bir transformatör gibi nominal akımının %120-130'una kadar sürekli aşırı yüklenmeye izin verebilir ve ayrıca gerekmesi durumunda kısa süreli olarak %200'üne yüklenebilir. Tristör Kontrollü Rektör'ün yanı sıra Tristör Kontrollü Seri Kondansatöre, Statik Var Kompansatör ve Statik Senkron Kompansatör ile rekabet etmektedir.

MCR başlıca avantajları;

- Geleneksel transformatör tasarımına benzer sağlam bir tasarıma sahip olması,
- Yüksek güvenilirlik,
- Optimum teknik ve ekonomik özellikler,
- Kolay bakım,
- Düşük fiyat,
- Yükseltici transformatör kullanılmadan direkt hatta bağlanmasıdır.

MCR kullanılması sistemlerde;

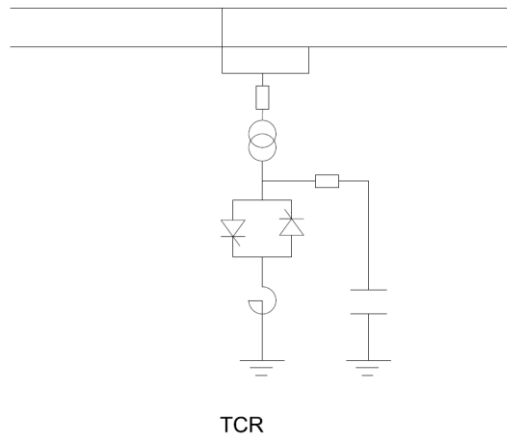
- Elektrik şebekelerinin günlük ve mevsimsel salınımlarının önüne geçilmesinde,
- Elektrik enerjinin kalitesinin artmasında,
- Güç sisteminin operasyonel prosedürlerini optimize etmesinde ve otomatikleştirilmesinde, uzaktan kontrol ile elektriksel parametrelerdeki değişikliklere hızlı ve verimli bir şekilde yanıt verilmesinde,
- İletim ve dağıtım sistemlerinde enerji kayıplarının azalmasında,
- Şebeke kararlılığının artmasında,
- Reaktif güç kompanzasyon cihazlarının anahtarlama sayısını azaltarak veya ortadan kaldırarak elektrik ekipmanlarının bakım koşullarının iyileşmesinde,
- Aktif güç akışları termal veya kararlılık sınırlarına yakın olduğunda yüksek gerilim hatlarının iletim kapasitesinin artmasında ve güvenli otomatik voltaj kontrolü sağlanmasında,
- Kapasitörle paralel çalışarak, kapasitörlerin anahtarlanmasından kaynaklı dezavantajların ortadan kalkmasında,
- Şebekede meydana gelen karışık olaylardan sonra şebeke çökmelerinin önlenmesinde kilit rol oynayabilir.

MCR'ler örnek olarak;

- Elektrik tüketiminde günlük veya mevsimsel dalgalanmaya maruz kalan şebekelerde,

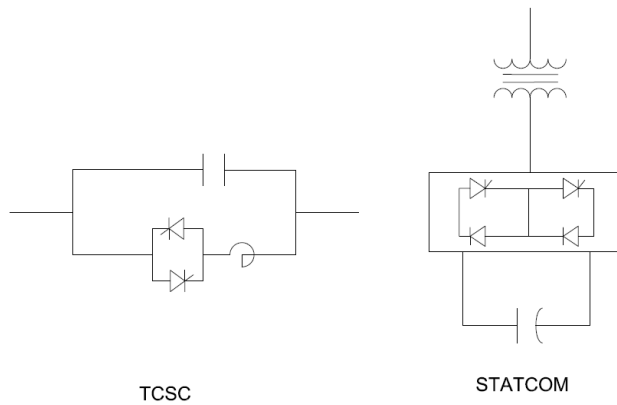
- Gerilim stabilizasyonu için düzenli olarak kullanılan, yıpranmış anahtarlama ve transformatör ekipmanlarına sahip hatlarda,
- Yüklerin veya güç yönlerinin sık sık değişmesine eğilimli, uzun iletim hatlarını içeren şebekelerde,
- Gerilim değişimine hassas olan dağıtım şebekelerinde,
- Güç jeneratörlerinin istenilen reaktif güç aralığında çalışmayacağı gerilim profiline sahip şebekelerde kullanılabilir.

Aşağıda TCR için kapasitörle paralel kombine çalışma sağladığı bir sistem gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Tristör Kontrollü Reaktör.

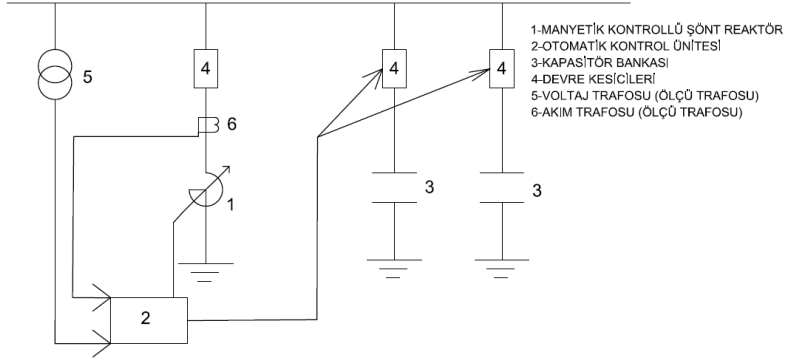
TCR sistemleri sabit bir endüktansa uygulanan gerilimi keserek rms değerini değiştirir ve bu sayede çekilen endüktif yük değerini ayarlamış olur.



Şekil 2.13. TCSC ve STATCOM.

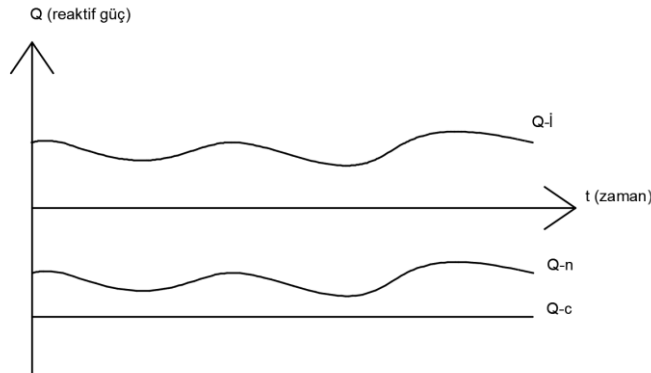
Yukarıda ise aynı şekilde MCR yerine kullanılabilecek olan TCSC ve STATCOM gözükmektedir. Bu tip sistemlerin de maliyeti yüksek ve bakımları fazladır.

Aşağıda MCR ve kapasitörlerden oluşan kombine edilmiş bir reaktif güç sistemi gösterilmiştir. Bu reaktif güç sisteminin başlıca avantajı kapasitör sisteminin anahtarlamasını azaltarak hem maliyet hem de anahtarlama kaynaklı sistemin girişinde oluşabilecek yüksek frekanslı dalgaların engellenmesidir.



Şekil 2.14. MCR ve kapasitör bankası.

Bu sistem ihtiyaca göre değişken reaktif güç gösterebilir yani yük eğrisi gibi reaktif güç eğrisi elde edilmesine imkân sağlar. Aşağıda ise bu sistemin çıkışından elde edilebilecek bir kapasitif reaktif güç ihtiyaç eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.15. MCR ve kapasitör bankası reaktif güç üretimi.

TCR ve MCR, reaktif güç kompanzasyon kontrolünün amacına ulaşmak için tristörün kontrol açısını değiştirerek eşdeğer endüktansın kademesiz kontrolü gerçekleştirilir ancak elektrik özelliklerinde, üretim maliyetlerinde, elektrik şebekesinin oluşturduğu harmonik kirlilikte önemli farklılıklar vardır. Ayrıca TCR ve MCR kontrol açılarının başlangıç noktası ve etkin aralıkları farklı olduğundan, bunlar ancak aynı dengeleme kapasitesi temelinde karşılaştırılabilir. Her iki ürün de harmonik üretmektedir, MCR harmonik içeriği daha fazladır ama iki üründe de harmonik mevcuttur. MCR'deki fazlalık manyetik valflerin yapısı ile optimize edilerek büyük ölçüde geliştirilebilir.

Genel olarak kontrol edilebilir iki reaktörün THD değerleri, çıkış kapasitesinin yüzdesi arttıkça kademeli olarak azalacaktır. Bu nedenle kontrol edilebilir reaktörün mümkün oldukça büyük kapasitede çalıştırılması gerekmektedir.

TCR ve MCR fiziksel yapısı, çalışma özelliklerine göre, TCR'nin her durumda doğrusal koşullar altında çalıştığı varsayılırken, MCR temel olarak doğrusal olmayan koşullar altında çalışmaktadır, dolayısıyla TCR genellikle içi boş reaktördür ve MCR'nin demir olması gerekir. Aksi takdirde reaktörün çekirdeğinin doygunluğu ayarlanamaz.

TCR'nin hacmi aynı kapasitedeki MCR'ye göre daha büyük ancak reaktör maliyeti daha düşüktür. İki ürünün de anahtarlama maliyetleri önemli ölçüde farklıdır. TCR'deki tristörlerin çalışma voltajı hat voltajı ile aynıdır, MCR de ise hat voltajının % 1-3'ü arasındadır.

Tablo 2.1. TCR ve MCR karşılaştırılması.

	TCR	MCR
Reaktör Maliyeti	Düşük	Yüksek
Anahtarlama Maliyeti	Çok yüksek	Düşük
Kontrol Maliyeti	Biraz daha yüksek	Orta
Bakım Maliyeti	Biraz daha yüksek	Daha düşük

MCR ile karşılaştırıldığında TCR'nin en büyük avantajı dinamik tepki hızının MCR'ye göre çok daha yüksek olmasıdır. TCR 50Hz sistemde 8,33 ms gecikmektedir.

MCR'nin çalışma prensibine göre dinamik tepki hızı yüksüz duruma ulaşmak için kontrol açısının hızla artmasıyla veya emme kapasitesini arttırmak için kontrol açısının hızla azalmasıyla gerçekleştirilse de MCR'nin zaman sabiti çok büyüktür. Çünkü MCR'nin endüktansı genellikle daha büyüktür ve endüktans akımın yükselişi veya düşüşünden bağımsız olarak sargı iletkenin direnci nispeten küçüktür. Hızlı kontrol çıkışı elde etmek zordur. MCR zaman sabit L/R 'dir. Tepki süresini arttırmanın veya zaman sabitini azaltmanın yöntemlerinden biri endüktansı L 'yi ateşleme süresi içinde hızlı bir şekilde azaltmak, diğeri ise R 'yi hızla arttırmaktır. MCR'nin tepki süresini çözümlen bir çok yolu vardır ama öncelik sistem karalılığıdır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda MCR tepki süresi 30ms seviyelerine kadar düşürülmüştür.

2.1.11. Reaktörlerin Bakımı

Reaktörlerin uzun yıllar devrede kalabilmesi için düzenli olarak bakım ve kontrol işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Devreye alınmış bir reaktörde gözlenmesi gereken önemli bölgeler aşağıda sıralanmıştır.

- Reaktörün soğutma işlemini sağlıklı yapabilmesi için yüzey temizliği,
- Mekanik kısımların kontrolü,
- Boyalı kısımlarının boyalarının kontrolü,
- Somun, rondela, saplama ve kablo pabuçları, boru bağlantı pabuçlarındaki oksitlenmeler,
- Buşinglerde çatlak olup olmadığı,
- Hava kurutucusunda bulunan silikajelin rengi, miktarı ve pembeleştiği kısım,
- Ark boynuzunun mekanik durumu,
- Topraklama cıvatalarının gevşeyip gevşemediği, oksitlenip oksitlenmediği,
- Yağ ve sargı termometrelerini değerleri,
- Çift kadranlı termometre var ise elektrikli bağlantılarının kontrolünün yapılması,
- Genleşme deposundaki yağ seviyesinin kontrolü,
- Reaktör üzerindeki yağ kaçağlarının mevcut olup olmadığı,
- Bucholz rölesinin yağ seviyesinin ve elektriksel bağlantılarının kontrolü işletim sırasında dikkat edilmesi gereken noktalardandır.

2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modelleme

Manyetik Kontrollü Reaktörü modellemek için Ansoft Maxwell Sonlu Elemanlar Simülasyon yazılımı kullanılır. Maxwell sonlu ağ oluşturma mantığıyla çalışan büyük ölçekli bir yazılımdır ve elektromanyetik sektöründe yaygın olarak kullanılır. Karmaşık bir tasarım sürecine sahip ürünlerde bu tür yazılımların kullanılması üretim öncesi AR-GE harcamasını, karşılaşılabilecek sıkıntıları azaltarak maliyet ve teknik optimizasyonu sağlar. Analitik yöntemlerde geometrinin tam modelini dikkate alarak çözüm gerçekleştirmek çok zordur ve zaman alıcıdır. Bazı durumlarda geometrinin tamamını dikkate almamak sonuçlarda ciddi farklılıklara neden olabilmektedir. Bu yüzden geometride yapılacak sadeleştirme işlemleri ciddi önem kazanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan Maxwell yazılımı parça parça çözüm gerçekleştirir ve bu parçalardaki sonuçları birbirine entegre ederek nihai sonuca ulaşır.

Program manyetik alan şiddetini (H), manyetik akı yoğunluğunu (B), akım yoğunluğunu (J), elektrik akı yoğunluğunu (D), elektrik alan şiddetini (E) hesaplar. Elde edilen değerlerden istenilen değerler türetilir. Aşağıda maxwell eşitlikleri verilecektir.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.13)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{dD}{dt} \quad (2.14)$$

$$\nabla \times D = \delta_v \quad (2.15)$$

$$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt} \quad (2.16)$$

Model üzerinde biriken enerji hesabı için aşağıdaki formül kullanılacaktır.

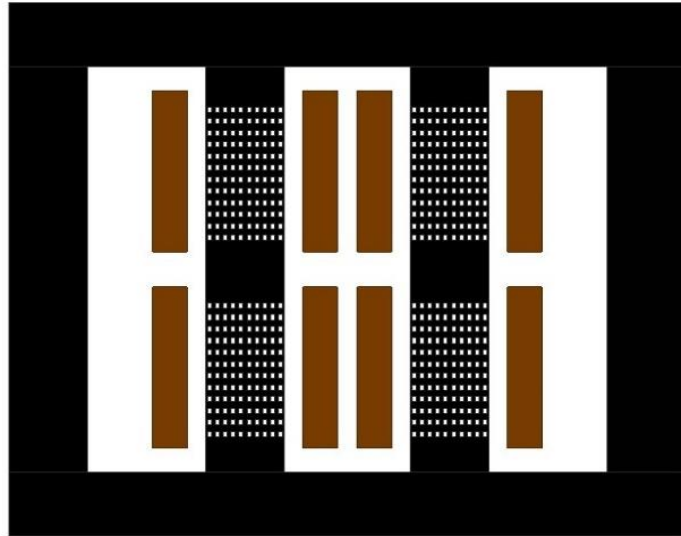
$$W_m = \int_V \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \, Dv \quad (2.17)$$

Elde edilen enerji endüktans hesabında kullanılır.

$$L = 2 \frac{W_m}{I^2} \quad (2.18)$$

Eşitlikte gösterilen W_m enerjisi, I reaktör akımını, L reaktör endüktansını göstermektedir.

Aşağıda reaktörün bir fazlı yaklaşık eşdeğer elektromanyetik devresi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere reaktör üzerinde bölgesel boşluklar bulunmaktadır. Bu bölgesel boşluklar sayesinde reaktör doyuma gitmektedir. Doyum sonucunda ise istenen endüktans değeri elde edilmekte ve ihtiyaç olan reaktif güç değerine ulaşılmaktadır.



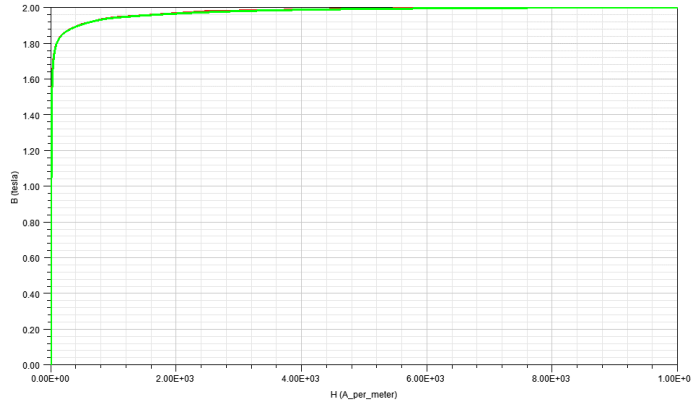
Şekil 2.16. MCR sonlu elemanlar modeli.

Modelde görülen sargılar hem AC hem de DC sargılardan oluşur. Reaktörde DC sargılar AC sargılar arasından alınarak reaktörün doyuma gitmesinde büyük rol oynarlar. Bu şekilde endüktans değeri değişmiş olur. Çalışmada tasarımı yapılan MCR'nin genel tasarım parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.2. MCR plaka değerleri.

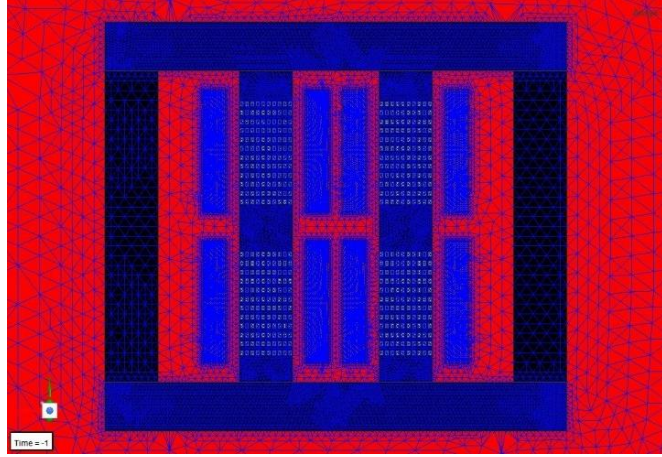
Gücü (kVAr)	2000
Gerilimi (kV)	31,5
Endüktans aralığı (H)	4,737-94,76
Frekansı (Hz)	50

Sonlu elemanlar çözüm modelinde gösterilen siyah kısımlar nüveyi temsil ederken, kahverengi kısımlar ise sargıları temsil etmektedir. Sargı malzemesi için alüminyum sargı kullanılırken, nüve için silisli sac kullanılmıştır. Aşağıda demir çekirdeğin B-H eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Manyetik malzeme B-H eğrisi.

FEM programıyla model çözüm için parçalara ayrılmıştır. Parça sayısı çözüm doğruluğu için önemli bir parametredir. Parça sayısı arttıkça doğru sonuca yaklaşılır ama belirli bir parça sayısından daha fazla parçalamak çözümü gereksiz uzatacaktır. Aşağıda parçalara ayrılmış eşdeğer model gösterilmektedir. Bu model doğru bir çözüm için yeterli sayıda parçalara ayrılmıştır.



Şekil 2.18. MCR parçalanmış FEM modeli.

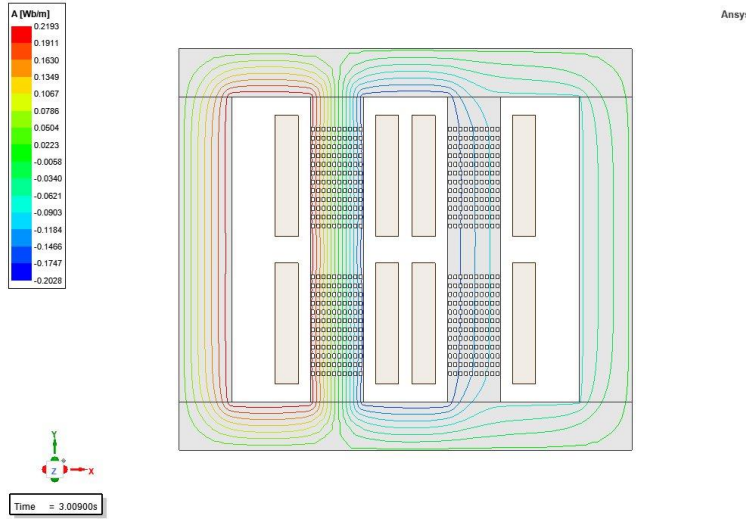
Reaktör için FEM programında harici uyurma yapılmış ve elektromanyetik analize uygun hale gelmiştir.

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE YORUMLANMASI

Bir önceki bölümde de açıklandığı gibi MCR modellenmiştir. Model çözümü gerçekleştirilecek ve sonuçlar yorumlanacaktır. Elde edilen sonuçlar ve yorumların üretim adına uygun olması halinde reaktör üretimi gerçekleştirilip test verileri, analiz sonuçları karşılaştırılacaktır.

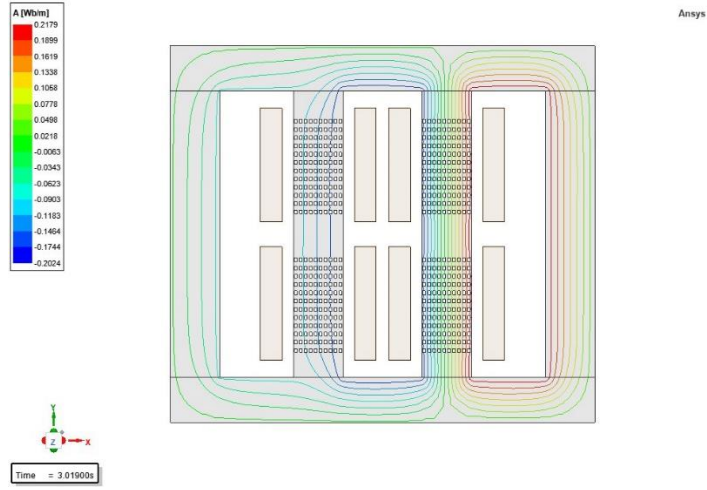
3.1. Nüvede Meydana Gelen Akı Dağılımı ve Kayıplar

Nüvede sargılarda indüklenen AC gerilim ve DC gerilim değerinden kaynaklanan iki farklı akı vardır. Bu akılardan AC kaynaklı akı değeri ve DC akı değeri değişerek reaktörün gücünde değişim meydana gelmektedir. AC ve DC akı değeri tasarım aşamasında sabit veya değişken alınabilir. Reaktörün akı dağılımı maksimum güç verdiği aşamada incelenecektir. Aşağıda bir bacak için maksimum akı değeri gösterilmiştir.



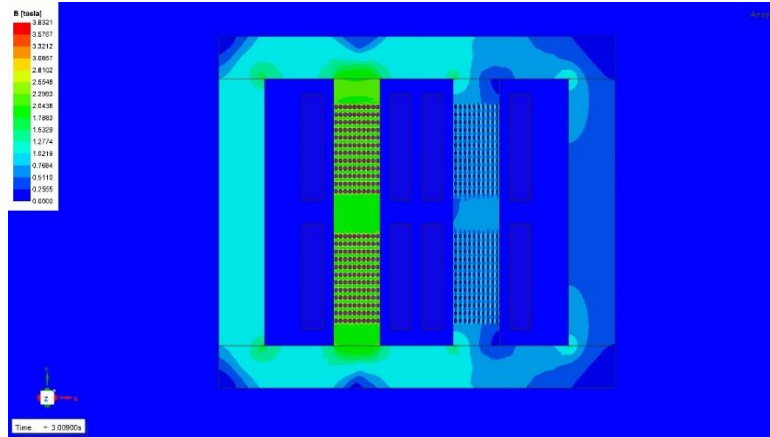
Şekil 3.1. MCR sol bacak akı dağılımı.

Şekilden de görüldüğü üzere bir bacak doyumda iken diğer bacak lineer bölgede çalışmaktadır. Aynı durum periyodun diğer yarısı için diğer bacakta da geçerlidir. Aşağıda ise diğer bacak için maksimum akı dağılımının meydana geldiği zaman adımı gösterilmiştir.



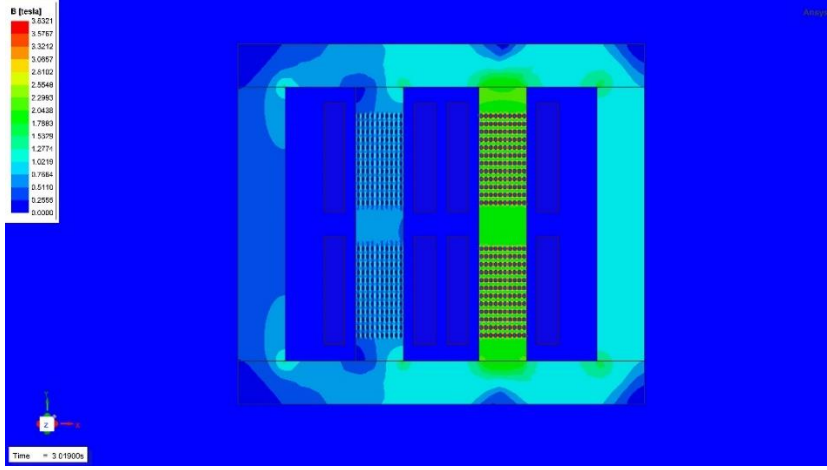
Şekil 3.2. MCR sağ bacak akı dağılımı.

Akı dağılımı aynı zamanda manyetik alan yoğunluğunu oluşturur. Tasarım için manyetik alan yoğunluğu ciddi önem arz eder. Aşağıdaki şekilde ise reaktörün sol bacağına meydana gelen manyetik alan yoğunluğu için dağılım gösterilmiştir.



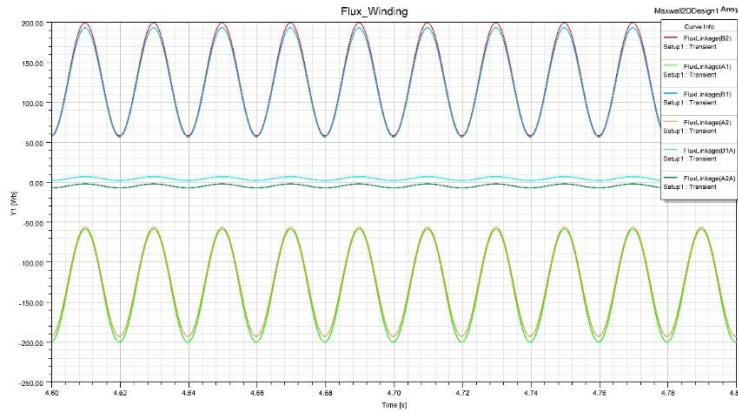
Şekil 3.3. MCR sol bacak akı yoğunluğu dağılımı.

Şekilden de görüldüğü üzere boşluklu yapıdan dolayı bölgesel doymalar meydana gelmiştir. Bu doymalar sayesinde reaktör gücü değiştirilmektedir. Sağ bacak için manyetik alan yoğunluğu dağılımı da aşağıda gösterilmiştir.

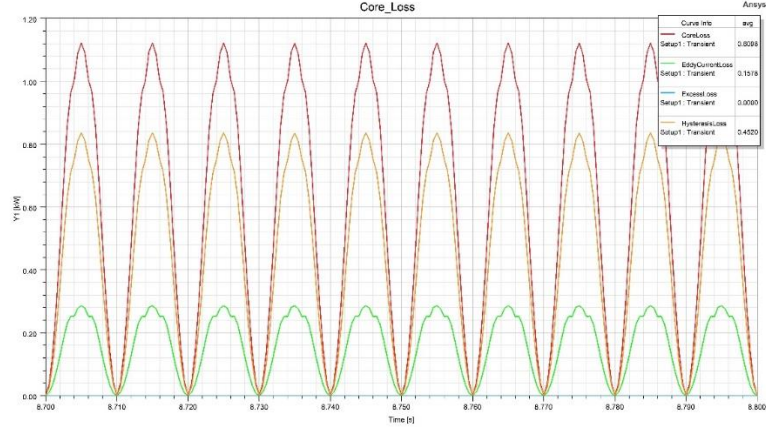


Şekil 3.4. MCR sağ bacak akı yoğunluğu dağılımı.

Sargıların nüveye indüklediği akı değerleri grafik olarak şekil 23’de verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere reaktör sargıları DC kaynaktan dolayı salınım merkezi ötelenmiştir. Bu öteleme aynı zamanda AC akının değerini de etkilemektedir. Bu yüzden endüktans değeri değişmektedir. Bacakların biri devredeyken diğer bacak devreden çıkarılmaktadır. Bu sayede reaktör bacakları sürekli devrede değildir.

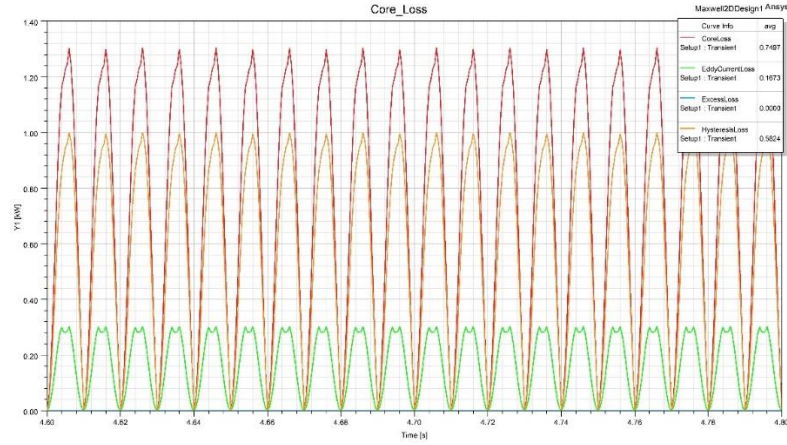


Şekil 3.5. MCR nüveye indüklenen akı salınımı.



Şekil 3.6. MCR nominal yüklenme nüve kayıpları.

Bir faz için nüvede 609,8 W kayıp meydana gelmiştir, bu kayıp değeri nominal yüklenmede meydana gelmiştir. Nüve kayıplarının %25'i eddy kayıplarıdır, kalan %75'lik kısım ise histerisiz kayıplarından oluşmaktadır.

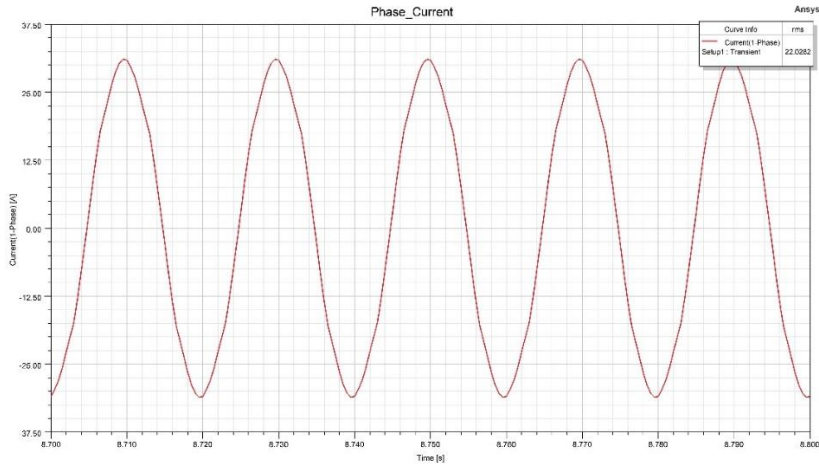


Şekil 3.7. MCR yük aşımı durumunda nüve kayıpları.

%17 fazla endüktif yükü yüklenmesi durumunda nüvede 750 W'lık (1 faz) kayıp meydana gelmiştir. Bu kayıpların %22'si eddy kayıplarını, %78'i ise histerisiz kayıplarını oluşturmaktadır. Bu değerler reaktör yüklenme derecesine bağlı olarak değişmekte ve bu değişim doğal olarak reaktör akımının harmonik bileşenlerini doğrudan etkilemektedir.

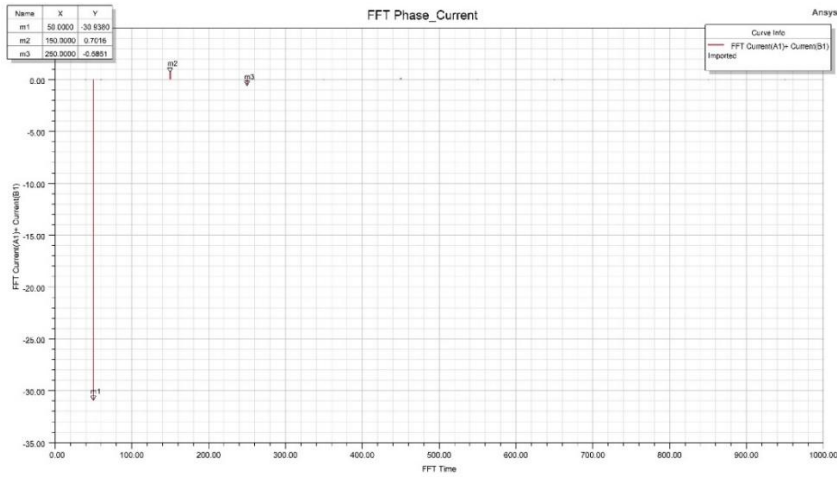
3.2. Sargı Akımı

MCR sargı akımları sürekli değildir. Tristörler ile reaktör akım değeri arttırılmaktadır. Bu değer müşterinin reaktif güç ihtiyacına göre değişir. Aşağıdaki şekilde reaktörün bir fazı için akım dalga şekli gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Tek faz nominal yüklenme sargı akımı.

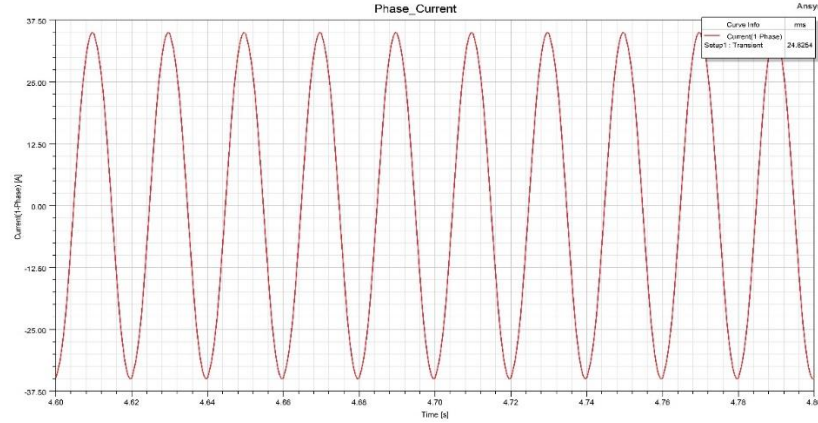
Reaktör akımının RMS değeri 22,028 A olarak gözükmektedir. Bu akım içeriği harmoniklidir. Harmonik içeriği tasarım açısından önemlidir, tasarım aşamasında bu harmonik değerleri hesaplanmalı ve tasarım buna göre koordine edilmelidir.



Şekil 3.9. Tek faz nominal yüklenme sargı harmonik içeriği.

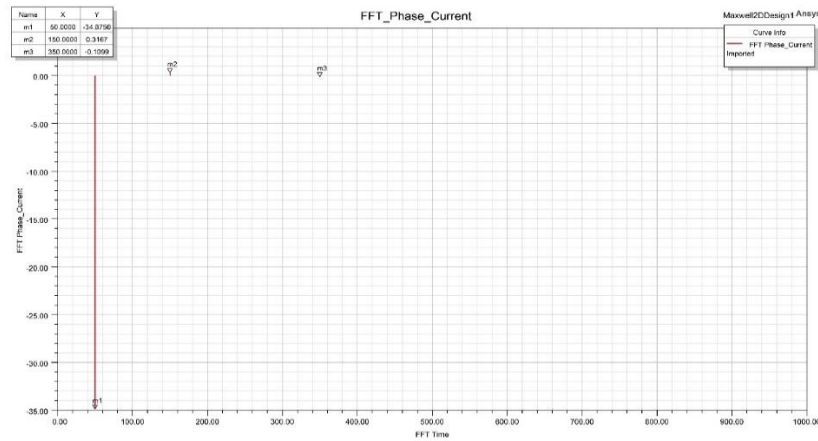
Reaktör akımı için harmonik analizi yapılmıştır. 3. harmonikler ana harmoniğin %2.26'sını oluşturmaktadır. 3.harmonik içeriği üçgen bağlı yapılarda sargı içerisinde kalmakta ve hatta yansımamaktadır. Üçgen bağlı sargılarda faz gerilimi direkt olarak sargı uçlarına uygulanmaktadır. Çok yüksek gerilim seviyelerinde üçgen bağlantı şekli reaktör izolasyonu için tehlike oluşturmakta ve tasarımı zorlaştırmaktadır. Bu yüzden çok yüksek gerilim seviyelerinde yıldız bağlantı tercih edilir. 5. harmonik değeri ise ana harmonik değerinin %1,891'i olarak hesaplanmıştır. Bu harmonik bileşeni bağlantının üçgen veya yıldız olmasından bağımsız olarak hatta yansır. Tasarlanan reaktör için bu değer düşüktür ve hattı çok fazla etkilememektedir.

Reaktör tristör açıları 90° 'ye doğru azaltılmış ve reaktörün çektiği akım nominal seviyenin üzerine çıkmıştır. Akım dalga şekli aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.10. Tek faz yük aşımı durumunda sargı akımı.

Reaktör akımı 24,82 A olmuştur ve bu değer nominal akımın %17 üzerindedir. Akım dalga şeklinin sinüs formuna daha da yaklaştığı görülmüştür. Harmonik içeriği aşağıda verilecektir.



Şekil 3.11. Tek faz yük aşımı durumunda sargı harmonik içeriği.

3. harmonik içeriğinin değeri ana harmoniğinin %0,9'u olarak hesaplanmıştır. 5. harmonik içeriği ise %0,315'i olarak hesaplanmıştır. Grafiklerden de görüleceği üzere harmonik içeriği yüklenmeye göre değişmiştir. Reaktör doyum derecesi arttıkça harmonik içeriği azalmıştır.

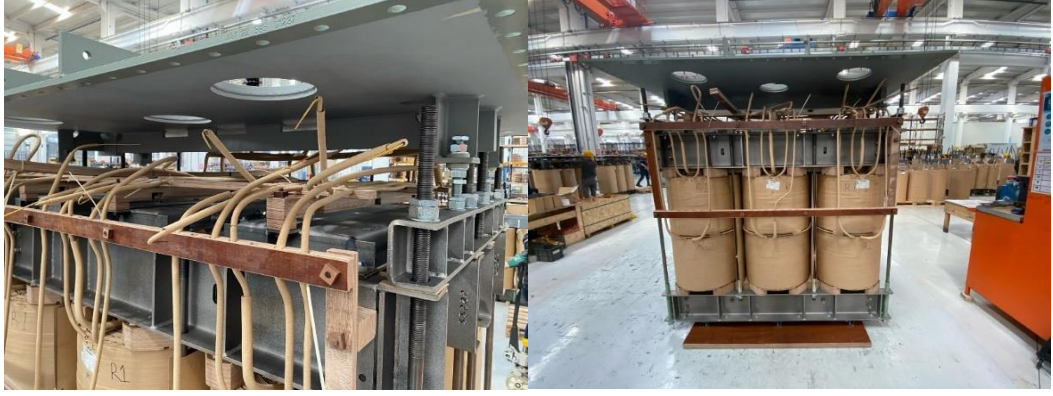
Tablo 3.1. MCR harmonik yüzdeleri.

%	3.Harmonik	5.Harmonik
Nominal Güç	2,26	1,891
Güç Aşımı(%17)	0,9	0,315

4. UYGULAMA

Hesapları ve elektromanyetik analizleri yapılan reaktör, üretim için uygun hale gelmiştir. Öncelikle bobinler tasarımda tespit edilen siper sayısı kadar sarılmış, belirtilen noktalardan sargı uçları sargı dışına alınmıştır. Reaktör sargısında her katın gerilimi farklıdır bu yüzden katlar arası yalıtım bu gerilim değerine uygun yapılmalıdır. Siperler için her telin kendi yalıtım malzemesi bulunur. Potansiyel fark sadece katlar arasında değil aynı zamanda reaktörün topraklı kısımları olan kazan, klemp ve nüveye karşı da mevcuttur. Bu kısımların yalıtımı için elektriksel mesafeler ve izolasyon yağı kullanılır. Sargılar presbant, kâğıt, mika, plastik maddeler, pamuk reçine, ağaç takozlar ve pertinaks gibi bazı maddeler koyularak yalıtılmaktadır. Havanın delinme gerilimi 20kV/cm, presbantın 30kV/cm, yağların ise 100-200kV/cm arasındadır. Nüve için hesaplanan steplerde gerekli kalınlıkta nüve kesimi gerçekleştirilmiştir. Kesimi tamamlanan nüveler dizim masalarında tasarıma uygun şekilde dizilmiş, dizimi biten nüve, masadan ayağa kaldırılmış ve bobinler boyunduruğun diziliminden önce nüve bacalarına yerleştirilmiştir. Sonrasında nüvenin boyunduruğu montajlanmış ve montaj aşamasının ilk adımı tamamlanmıştır. Sargılardan çıkan uçların yalıtımı izolasyon mesafelerine dikkat edilerek yapılmıştır. Kapak montajı ve sargı uçlarının buşinglere montajı gerçekleştirilmiş, reaktör aktif kısmı hazır hale gelmiştir.

Aktif kısmın üretiminin bitiminden sonra reaktöre ön testler ve ön prosesler uygulanmış, reaktör kazan içerisine indirilmiş, yağ basıma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekillerde reaktörün üretim aşamalarından kesitler gösterilmiştir.



Şekil 4.1. MCR buşing bağlantısının yapılması



Şekil 4.2. MCR aktif kısım üretim sonu

Prototip aşamasında;

- Yetersiz ve uygun olmayan kurutma,
- Yağın yeterli şekilde tretman yapılmaması,
- Yetersiz ham madde kullanılması ve tasarıma uyulmaması gibi durumlar ciddi önem arz etmektedir.

Tüm bu işlemlerin ardından ve aşağıdaki aksesuarların eklenmesinden sonra reaktör teste hazır hale gelmiştir.

Eklenen aksesuarlar;

- Buchholz Rölesi
- Çift Kontaklı Yağ Termometresi
- Kontaklı Yağ Seviye Göstergesi
- Kontaklı Basınç Emniyet Valfi

- Hava Kurutucusu
- Klemens Kutusu
- İki Yöne Dönebilen Tekerlek
- YG Buşing: 30 NF 250 A Porselen (25 mm/kV)



Şekil 4.3. MCR üretim sonu

Radyatörler haricinde aksesuarların eklenmiş hali yukarıda görülmektedir. Tam bir test için radyatörlerin eklenmesi gerekmektedir. Radyatörler eklenip testlere başlanılacaktır. Radyatörler eklenmeden reaktör uzun süre devrede kalmamalıdır. Basit ve uzun sürmeyen testler radyatör düzeneği bağlanmadan gerçekleştirilebilir.

Reaktör ünitesine, izolasyon testleri, direnç ölçümleri, oran testleri yapılmış ve yükte testi gerçekleştirilmiştir.

Direnç ölçümünde “RATECH WR50-13” cihazı kullanılmıştır. Tasarım aşamasında reaktörün sargı ayar uçlarından okunacak değerler hesaplanmaktadır, ölçülen değerlerin sıcaklığa bağlı olarak ötelenmesiyle tasarım değerlerine yakın olması gerekmektedir. Bu test her faz için ayrı ayrı yapılır. Ölçülen direnç değerlerinin tasarım aşamasındaki değerlere yakın olmasının yanında fazlar arası da benzer olması beklenir. Değerler tasarım değerleri ile uyumuştur ve oran testine geçilmiştir.

Oran testi “OMICRON CPC100” cihazı ile yapılmaktadır. Reaktör girişinden 400 V uygulanmakta ve diğer uçlarda oluşan gerilim ölçülmektedir. Tasarım aşamasında bu

test sonucunda okunacak değerler hesaplanmaktadır. Ölçüm sonuçları tasarım esnasında hesaplanan değerler ile aynı çıkmıştır.

Reaktöre AC yüksek gerilim verilmeden önce son olarak izolasyon testi yapılmalıdır. Bu test “MEGGER MIT 525” cihazı ile yapılmıştır ve başarı ile sonuçlanmıştır. Sonrasında ise uygulanan ve indüklenen gerilim testleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlarda herhangi bir sorun gözükmemesi üzerine reaktöre kontrol elamanları, tristör ve diyot bağlantısı, otomasyon ünitesinin bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Aşağıda test ortamına alınan reaktör gözükmektedir.



Şekil 4.4. Test aşaması.

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 arttırılıp nominal seviyeye getirilmiştir, sonrasında ise tristörlerin tetikleme açıları değiştirilmeye başlanmış 180°’den 90°’ye doğru yavaş yavaş azaltılmıştır. Bu açıların azalmasına paralel olarak reaktör lineer bölgeden çıkmış ve nominal endüktans değerine yani nominal güce ulaşmıştır.

Tablo 4.1. MCR test sonuçları.

TETİK AÇISI	Q(kVAr)	GERİLİM (kV)	P(kW)
164	121	31500	-
150	420	31500	-
145	570	31500	-
140	740	31500	-
130	1120	31500	-
125	1340	31500	-
120	1570	31500	-
115	1820	31500	-
112	2000	31500	30500
110	2070	31500	-
105	2350	31500	-

Tablo 4.2. MCR nominal sıcaklığa ötelenmiş kayıplar.

	75 C°
2000 kVAr (Pk)	32329 W

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 edilmelidir.

Reaktörün sargı bağlantı biçiminin harmonikler üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Tasarımı yapılan MCR’de 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 ana kayıplar eddy ve histerisiz kayıplarıdır. Nüvede oluşan akı değeri arttıkça toplam nüve kayıplarının daha fazla olduğu test ve analiz ortamında görülmüştür. Bu çalışmada nüvenin birleşme noktalarında meydana gelen kayıp artışları üzerinde durulmamıştır.

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 değişimler öngörülmüştür ve planlanmış, reaktör tasarımı buna göre yapılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kompanzasyonun enerji sistemleri için vazgeçilmez olduğu bilinmektedir. Yıllardır artan teknoloji ile de her ne kadar transformatör sektöründe meydana gelen gelişmeler sınırlı olsa da reaktif güç konusunda ciddi gelişmeler meydana gelmiş, bu sektörde ürünler zamanla gelişmiş ve değişmiştir. MCR son yıllarda yaygınlaşmış, sadece reaktif güç sağlayıcı olmaktan çıkmış sistemde kombine çalışmaların önemli bir parçası olmuştur.

MCR sisteminde reaktör gücü tristörlerin tetik açısına göre değişmektedir. Bu açı değişimine bağlı olarak reaktörün endüktansı düşmekte ve çektiği akım artmaktadır. Bu artış sonucunda sadece sargı kayıpları değil nüvede meydana gelen kayıp değerlerinde de artış yaşanmaktadır. Artışın nedeni nüvede meydana gelen ana frekanstaki ve harmoniklerdeki akı yoğunluğunun artmasıdır. Yüksek frekanslı akılar nüvede meydana gelen eddy kayıplarını daha da arttırmaktadır. Ayrıca bu artış yüksek frekanslı bileşenlere ek olarak DC akıdan da kaynaklanmaktadır. Nüve DC bileşene AC bileşende olduğu gibi tepki vermemektedir. Tüm bu kayıp artışları tasarım aşamasında öngörölmüş ve hesaplanmıştır.

Bu çalışmada analiz ortamında nüve kayıpları nominal güç değerinde 1830 W olarak hesaplanmıştır. Sargı kayıpları ise 75 derece sargı sıcaklıkları baz alınarak analiz ve hesap ortamında 25610 W olarak elde edilmiştir. Kazan, kapak ve ek destek parçalarında meydana gelen kayıplar ise 3000-5000 W bandında beklenmektedir.

Standartlarda kayıplar referans sıcaklık olan 75°C'ye ötelenir. Test sonuçlarında ölçülen kayıplar referans sıcaklığa ötelenmiştir. Test edilen MCR de toplam kayıplar 75 derece sıcaklıkta 32329 W olarak elde edilmiştir ve kayıplar beklenen değere yakındır.

Teorik olarak tasarımı yapılan çalışma analiz sonuçlarıyla desteklenmiş ve başarılı bir şekilde üretimi gerçekleşmiştir. Testleri başarı ile tamamlayan prototip ürün seri üretim için hazır hale gelmiştir.

Seri üretim sonrasında sahaya sevk edilecek reaktörlerde kullanıcının yanlış projelendirmesinden, yanlış montajdan, yetersiz yada eksik koruma yapmasından, reaktörün bakımının zamanında yapılmaması veya eksik yapılmasından, anormal çalışma şartlarından, devreye girme anındaki yüksek gerilim darbelerindeki yüksek frekanslı dalgadan, ani devreye alma ve çıkarma olaylarından, atmosferik aşırı gerilimlerinden kaynaklı arızaların meydana gelmemesi için gerekli uyarılar yapılmış ve kullanıma uygun olması adına önerilerde bulunulmuştur.

İleriki akademik çalışmalarda kazan, ek aksesuarlar ve sargıda meydana gelen kayıplar, nüve birleşme noktalarında meydana gelen kayıplar ve harmonikler, MCR'nin diğer kompanzasyon sistemleri ile koordineli kompakt bir şekilde çalışması, tepki süresinin kısaltılması, ses seviyesinde iyileştirme, kayıplarının azaltılması üzerine çalışılacaktır.

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. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911802062>
- [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. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/486/1/012122>
- [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. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2018.8602119>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.086>
- [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. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535891>
- [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. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2778142>
- [7] Xu, X. (2014). Research on magnetic valve structure optimization of magnetic controlled reactor. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 8(1). <https://doi.org/10.2174/1874155X01408010655>
- [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. <https://doi.org/10.1109/AIEEE.2014.7020324>
- [9] Xu, X. (2014). Research on magnetic valve structure optimization of magnetic controlled reactor. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 8(1). <https://doi.org/10.2174/1874155X01408010655>

- [10] 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. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.027>
- [11] Jenipher, R. N., & Chandrakala, K. V. (2017, April). Magnetically controlled reactor based harmonic and voltage profile improvement in long transmission lines. In 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IPACT.2017.8244958>
- [12] 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. <https://doi.org/10.1109/AIEEE.2014.7020324>
- [13] Xing, J., Zhang, Y., Chen, G., Yu, W., & Dai, Z. (2022). Study on the effect of different pre-excitation factors on the output characteristics of MCSR. *Energy Reports*, 8, 320-327. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.144>
- [14] Zheng, T., & Liu, X. (2020, August). Analysis of Power Regulation of Magnetically Controlled Shunt Reactor and Its Impacts on Protection. In 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM) (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9281485>
- [15] Wass, T., Hornfeldt, S., & Valdemarsson, S. (2006). Magnetic circuit for a controllable reactor. *IEEE transactions on magnetics*, 42(9), 2196-2200. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.878307>
- [16] Zheng, T., Huang, T., Zhang, F., Zhao, Y., & Liu, L. (2017). Modeling and impacts analysis of energization transient of EHV/UHV magnetically controlled shunt reactor. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27(7), e2330. <https://doi.org/10.1002/etep.2330>
- [17] Bazilev, B., Bepalov, V., Dyagileva, S., Makarov, P., Makarova, M., & Oleksyuk, B. (2012, June). Dual scheme based mathematical modeling of Magnetically Controlled Shunt Reactors 6–500 kV. In 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PQ.2012.6256197>
- [18] VARDAR, T., Ertuğrul, Ç. A. M., & YALÇIN, E. (2010). Reaktif Güç Kompanzasyonu ile Enerji Verimliliği ve Kamu Kurumlarında Reaktif Güç Kompanzasyonu. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2(2),20-24. <https://dergipark.org.tr/en/pub/umagd/issue/31720/345719>
- [19] Süleyman, A. D. A. K., Cangı, H., & YILMAZ, A. S. (2019). Doğrusal Olmayan Yüklerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi ve Harmonik Bileşenlerin Süzülmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 7(1), 153-164. <https://doi.org/10.29109/gujsc.454079>
- [20] Arabul, A. Y., Emre, K. U. R. T., Arabul, F. K., & Şenol, İ. (2020). Hava aralıkları eşit dağıtılmış şönt reaktör modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 286-294. <https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/53633/715819>

- [21] GENCER, Ö., YÖRÜKEREN, N., MALKOÇ, A., & KARTAL, H. ORTA GERİLİM TRİSTÖRLÜ KOMPANZASYON SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI. https://www.emo.org.tr/ekler/805e7bbffee75f4_ek.pdf
- [22] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.07.002>
- [23] Cheng, S. J., Malik, O. P., & Hope, G. S. (1988). An expert system for voltage and reactive power control of a power system. *IEEE Transactions on power systems*, 3(4), 1449-1455. <https://doi.org/10.1109/59.192952>
- [24] Jain, S. K., & Agarwal, P. (2003). Design simulation and experimental investigations, on a shunt active power filter for harmonics, and reactive power compensation. *Electric power components and systems*, 31(7), 671-692. <https://doi.org/10.1080/15325000390203674>
- [25] Liu, L., Li, H., Xue, Y., & Liu, W. (2014). Decoupled active and reactive power control for large-scale grid-connected photovoltaic systems using cascaded modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(1), 176-187. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2304966>
- [26] Liu, C., Sun, K., Rather, Z. H., Chen, Z., Bak, C. L., Thøgersen, P., & Lund, P. (2013). A systematic approach for dynamic security assessment and the corresponding preventive control scheme based on decision trees. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(2), 717-730. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2283064>
- [27] Tümay, M., Demirdelen, T., Bal, S., Kayaalp, R. İ., Doğru, B., & Aksoy, M. (2016). Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör için Uygulanan Kontrol Yöntemlerini Literatürİncelemesi. <http://openaccess.iste.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12508/894>
- [28] Ma, C., Bai, B., An, Z., & Dong, Y. (2014, October). Study on main magnetic field of ultra-high voltage magnetically controlled saturated reactor. In 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 3615-3619). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2014.7014118>
- [29] Tian, M., Li, Q., & Li, Q. (2004). A controllable reactor of transformer type. *IEEE transactions on power delivery*, 19(4), 1718-1726. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.832352>
- [30] Yifan, W., Cong, S., & Guozhu, C. (2014, June). A novel control algorithm for magnetically controlled reactor. In 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 360-365). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864639>
- [31] Ebrahimi, M., Zeinali, R., & Siahkali, H. (2015, February). A multi-objective model for allocation of Magnetically Controlled Shunt Reactors. In 2015 IEEE 8th GCC Conference & Exhibition (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEEGCC.2015.7060078>

- [32] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.07.002>
- [33] Wang, P., Chen, B., Tian, C., Sun, B., Zhou, M., & Yuan, J. (2016). A novel neutral electromagnetic hybrid flexible grounding method in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(3), 1350-1358. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2526054>
- [34] Hong, L., Zhongdong, Y., & Weixian, C. (1998, August). Research on voltage regulation of magnetic valve controlled reactor based on thyristor. In *POWERCON'98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No. 98EX151)* (Vol. 1, pp. 664-667). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPST.1998.729048>
- [35] Chen, X., Chen, B., & Tian, C. (2009, April). A novel control method for magnetic-valve controllable reactor. In *2009 First International Workshop on Database Technology and Applications* (pp. 72-75). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DBTA.2009.137>
- [36] Jin, Xiao, Guoqiang Zhang, and Runrui Guo. "Simulation analysis of control system in an innovative magnetically-saturated controllable reactor." *Journal of Power and Energy Engineering* 2.04 (2014): 403. . <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.24054>
- [37] Yifan, W., Cong, S., & Guozhu, C. (2014, June). A novel control algorithm for magnetically controlled reactor. In *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 360-365). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864639>
- [38] Bao-quan, K., Hong-jiang, T., & Liyi, L. (2008, October). Research on DC magnetic flux controllable reactor. In *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems* (pp. 4444-4447). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4771580>
- [39] Bao-quan, K., Hong-jiang, T., & Liyi, L. (2008, October). Research on DC magnetic flux controllable reactor. In *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems* (pp. 4444-4447). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4771580>
- [40] Zheng, W. (2014, September). Compound flexible control strategy for magnetically controlled shunt reactor suppressing overvoltage. In *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CICED.2014.6991962>,

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İsmet KAYMAZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lise** : 2017, Aksu Anadolu Öğretmen Lisesi
- Lisans** : 2021, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik & Elektronik Mühendisliği Bölümü
- Yüksek lisans** : 2024, Sakarya Üniversitesi, Elektrik & Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Ağustos 2021'de Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliğini ve Mühendislik Fakültesini birinci olarak tamamladı.
- Ağustos 2021'den beri Astor Enerji firmasında Özel Transformatörler Tasarım ve Analiz Mühendisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- KAYMAZ, İ., BAYRAK, M., & TURSUN, S. MANYETİK KONTROLLÜ ŞÖNT REAKTÖRÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ.
- 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.