



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.07.2022
Kabul Tarihi : 15.08.2022

Received Date : 01.07.2022
Accepted Date : 15.08.2022

ZAYIF AC SİSTEMLERE BAĞLI VSC-HVDC'NİN VEKTÖREL KONTROLU

VECTORAL CONTROL OF VSC-HVDC CONNECTED TO WEAK AC SYSTEMS

Kadir ABACI^{1*} (ORCID: 0000-0001-5627-0032)
*Volkan YAMAÇLI*² (ORCID: 0000-0003-0331-8818)
*Aykan BÖLÜKBAŞI*¹ (ORCID: 0000-0003-1833-4335)

¹Mersin Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye
²Mersin Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kadir ABACI, kabaci@mersin.edu.tr

ÖZET

Gerilim kaynaklı dönüştürücülere (VSC) dayalı yüksek gerilim-doğru akım (HVDC) güç sistemleri son yıllarda popüler bir konu haline gelmiştir. Bu makale, zayıf bir AC sistemi için çeşitli sistem hataları ve aşırı yüklenme koşulları altında vektör kontrol tekniği ile VSC tabanlı bir VSC-HVDC sisteminin bir modelini ve kontrol performansını incelemektedir. VSC-HVDC sisteminin matematiksel modeli, sistem parametrelerini en uygun şekilde ayarlamak için kontrol edilen ve kontrol edilen değişkenlerin bir simülasyon modelini ilişkilendirmemize izin verir. Bu nedenle, DC bara gerilimini korumak amacıyla aktif ve reaktif gücü ayarlamak için uygun bir vektör kontrol tekniği kullanılır. Bu makalede sunulan kontrol sistemi, sistem salınımını verimli bir şekilde söndürebilen ve sistem geçici ve kararlı durum kararlılığını sürdürebilen dış kontrol döngüsü ve iç kontrol döngüsünü içerir. Vektör kontrol yaklaşımı, zayıf bir 6 baralı AC iletim sisteminde test edilmiştir. Modelin verimliliğini ve kontrol yönteminin güç aktarım limitinin iyileştirilmesine uygulanabilirliğini göstermek ve doğrulamak için DIgSILENT PowerFactory 15.0 yazılımında dinamik simülasyonları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: VSC-HVDC, vektör kontrolü, zayıf AC sistem.

ABSTRACT

High voltage-direct current (HVDC) power systems which are based on voltage-sourced converters (VSC) have become a popular subject in recent years. This paper studies a model of a VSC based VSC-HVDC system and its control performance due to vector control technique under various system faults and over-loading conditions for a weak AC system. The mathematical model of VSC-HVDC system allows us relates a simulation model of the controlling and the controlled variables in order to adjust the system parameters, optimally. Thus, a suitable vector control technique is used to adjust active and reactive power with the aim of maintaining DC link voltage. In the paper the presented controlling system includes the outer control loop and inner control loop that can efficiently damp out the system oscillation and maintain system transient and steady-state stability. The proposed control approach is tested in a weak 6-bus AC transmission system. In order to show and validate the efficiency of the proposed model and the applicability of the control method on improving the power transmission limit and dynamic simulations are conducted in DIgSILENT PowerFactory 15.0 software.

Keywords: VSC-HVDC, vector control, weak AC system

GİRİŞ

Yüksek Gerilim Doğru Akım iletim sistemi (HVDC iletim sistemi), uzun mesafeli toplu güç iletimi ve iki ayrı AC sistemi bağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna ilave olarak komşu şebekeler arasında gerek asenkron bağlantıya imkan veren, gerekse de şebekeler arasında arıza izolasyonu sağlayan sırt-sırtta bağlı HVDC sistemleri de mevcuttur (Yakupoglu, 2019). 1954 yılında İsveç-Gotland arasında kurulan 20 MW kapasiteli hat dünyanın ilk ticari HVDC uygulamasıdır (Long W, 2007).

VSC-HVDC iletim sistemleri, genellikle deniz aşırı rüzgâr santralleri ile yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu için daha avantajlı bir seçenek olduğunu kanıtlamıştır. Bu amaca hizmet etmek için, havai iletim hattı ve deniz altı kablosuyla uzun bir mesafe boyunca bir toplu güç aktarımının olması gerekmektedir. Senkronize edilmemiş şebekeleri mevcut şebekeye bağlamak bir sorundur. Burada gerilim seviyesi ve frekans, bir AC bağlantısı üzerinden yapılan bağlantıyı kısıtlayan ana faktördür. Yukarıdaki sorunun ortadan kaldırılması için, kontrollü bir DC iletimini kullanarak uzun bir mesafe boyunca bir toplu güç iletimi için esneklik sağladığı bir çözümü vardır (Pan J. et al, 2008).

Zayıf AC güç sistemleri, kuvvetli AC güç sistemlerine nazaran yüksek empedansa ve daha düşük kısa devre oranına (KDO) sahiptir (Nawir, 2017). Zayıf AC güç sistemlerinde transfer kapasitesini arttırmak için en iyi çözüm yollarından birisi HVDC sistemlerinin kullanımınıdır. VSC tabanlı HVDC, zayıf ve pasif AC şebekelere bağlanabilen düşük ve orta güç iletimi için kullanılır ve sistem çalışma koşullarına bağlı olarak reaktif güç sağlama veya emme yeteneğine sahiptir. Geçmişten günümüze kadar bu alanda birçok çalışmalar yapılmış, son yıllarda özellikle sınır değerlerde çalışan zayıf AC güç sistemlerinde HVDC kullanımına artan bir ilgi olmuştur. Franken Andersson vd, (1990) zayıf bir AC şebekeye bağlanan HVDC konvertörünün model performansını analiz etmiştir. Davari M. ve Mohamed (2017) zayıf bir AC şebekeye bağlanan VSC-HVDC sistemde gerilim kontrolör kazancının, sistem kararlılığına olan etkisini araştırmışlardır. Aouini vd, (2017) çalışmada bir güç transfer stratejisi önerilerek zayıf AC şebekelerde VSC-HVDC ile kararlılığın iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Agusti Egea vd, (2015) zayıf bir şebekeye bağlı bir VSC-HVDC sistemi üzerinden güç akışı transferindeki sınırlamaları analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada önce açı ve gerilim kararlılıklarının etkisi incelenmiştir. Daha sonra L arayüzü vasıtasıyla zayıf bir şebekeye bağlı güç aktarım kabiliyeti eğrilerini yani PQ eğrileri hesaplanmıştır. Li, Xiaojun vd, (2021) zayıf bir AC sistemle bağlantısı HVDC iletiminde kullanılan gerilim kaynaklı konvertörlerin küçük işaret kararlılığı açısından kıyaslamasını yapmıştır.

Zayıf bir AC güç sisteminde HVDC'nin bağlandığı noktadaki gerilim kontrol edilmezse, AC/DC güç sisteminin konvertörleri tarafından tüketilen reaktif güçler nedeniyle gerilim azalabilir. Bunun sonucu olarak güç sistemlerinde arzu edilmeyen bir durumla karşılaşılabilir (Abacı, K., 2019). HVDC; güç akışının hızlı ve hassas kontrolü sayesinde şebeke kararlılığının artırılmasını sağlar. Bu tür sistemlerde VSC-HVDC'nin kontrol edilebilmesi oldukça önemli bir çalışma konusudur. A. J. Agbemuko vd, (2020) yayınladığı çalışmada zayıf şebekelerde pasiflik analizi tabanlı bir strateji geliştirilerek VSC'nin aktif güç yeteneğini iyileştirmişlerdir.

Literatürde, Dorantes, D.P. vd, (2013) $abc-dq$ dönüşüm ve üç boyutlu destek vektör makina tekniğine dayanarak bir VSC-HVDC kontrolörü tasarlamış ve uygulamıştır. Gengyin L. vd, (2006) $-dq$ referans çerçevesinde eşdeğer bir sürekli zaman durum uzay modeli oluşturarak VSC-HVDC 'yi kontrol etmeyi başarmışlardır. VSC-HVDC için iyileştirilmiş bir vektör kontrol tekniği önerilen bir çalışmada, PLL içeren VSC'nin önce dış kontrolü için doğrusal bir matematiksel modeli kurulmuş daha sonra zayıf akım şebekesine bağlanarak küçük işaret kararlılığı incelenmiştir (Shuaihu Li et al, 2019). Bir başka çalışmada, tek faz-toprak hatalarını kontrol etmek amacı ile VSC tabanlı sırt sırt bir HVDC sistemi için vektör kontrol tekniği önerilmiştir (Raath, P.K. et al, 2018). Diğer taraftan Sood V. vd, (2011) VSC tabanlı HVDC iletim sistemi için doğrudan ve vektör kontrol tekniklerinin EMTP-RV yazılım programında bir kıyaslamasını yapmışlardır. G. Tianyi vd, (2022) çok katmanlı bir VSC için Vektör kontrol tekniğini kayma kipli kontrol ile iyileştirilerek 2w salınımlarının ortadan kaldırılmasının yanı sıra, aktif ve reaktif güçlerin aynı anda kontrolünü başarmışlardır.

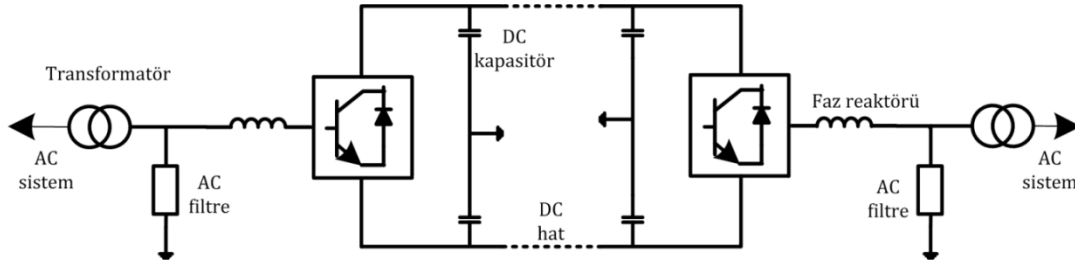
Konuyla ilgili literatürde VSC-HVDC sistemleri için doğrudan ve vektör kontrolü olmak üzere iki türlü kontrol stratejileri bulunmaktadır. Vektör kontrolü, Çok Katmanlı Konvertör (ÇKK) tabanlı DC güç sisteminde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Xia vd., 2021). Bu yöntemlerden bazıları, kapalı döngüde hem aktif hem de reaktif gücü kontrol ederek Doğrudan Güç Kontrolüne dayanmaktadır (Serpa, L.A. vd, 2007).

Vektör kontrolü, üç fazlı bir sistemi iki boyutlu bir uzaya dönüştürür. Bu yöntem aynı zamanda üç fazlı PWM dönüştürücüleri kontrol etmek için de kullanılır. PWM dönüştürücülerin kontrolünde, aktif ve reaktif gücü bağımsız olarak kontrol etmek için vektör kontrolü kullanılabilir. Reaktif gücün kontrolü, DC gerilimini değiştirmeden AC gerilim fazını değiştirilerek her bir dönüştürücüde ayrı ayrı gerçekleştirilebilir. Aktif güç, DC gerilim ayarlanarak veya AC gerilimin frekansı değiştirilerek kontrol edilir. Kontrol vektörünün kullanılmasının bir avantajı, akım vektörünün ve AC gerilimlerin sabit durum vektörleri olarak üretilmesi ve bu nedenle kontrol sistemindeki statik hataların PI kontrolörler kullanılarak düzenlenebilmesidir (Dasgupta, S. ve Agnihotri, G. 2009).

Bu makalenin amacı, zayıf AC sistemlerde kullanılan VSC-HVDC iletim sisteminin performansını artırmak için bir vektör kontrol stratejisi sunmaktır. Zayıf bir AC şebekede, üç faz toprak hatası ve en zayıf barada aktif ve reaktif güçlerin adım artımları oluşturulmuş ve vektör kontrol yöntemi, aynı anda hem aktif ve reaktif güçler ile DC bağlantı gerilimini bağımsız ve etkin bir şekilde kontrol etmiştir. Power Factory yazılım aracında, yapılan simülasyonlar sayesinde, uygulanan işlevselliklerin VSC-HVDC' nin dinamik performansını geliştirdiği tespit edilmiştir.

VSC-HVDC SİSTEMİ

Tipik bir VSC-HVDC sisteminin bileşenleri Şekil 1' de gösterilmiştir. Sistem AC filtrelerden, transformatörlerden, dönüştürücülerden, faz reaktörlerinden, DC kapasitörlerden ve DC kablolardan oluşmaktadır.



Şekil 1. VSC-HVDC Sistem Bileşenleri (Du, C., 2007)

Dönüştürücüler

VSC-HVDC sistemi, biri doğrultucu, diğeri inverter olarak çalışan IGBT güç yarı iletkenleri kullanan VSC' lerdir. İki dönüştürücü, uygulamaya bağlı olarak arka arkaya veya bir DC kablosuyla bağlanır. Gönderici uçtaki dönüştürücü doğrultucu rolünü, alıcı uçtaki dönüştürücü ise inverter rolünü üstlenir. İki dönüştürücü, uygulamaya göre arka arkaya veya bir DC kablosu ile bağlanmaktadır. Başlıca görevi, kontrol edilebilirliği yüksek olan doğrultucudan inverter istasyonuna sabit DC güç iletmektir. Bir VSC DC gerilimi kontrol ederken diğeri aktif gücün DC bağlantısı üzerinden iletimini kontrol eder. Dönüştürücülerin kayıpsız olduklarını varsayarsak, DC sistemine giren aktif güç akışı, inverter ucundaki AC sistemine ulaşan aktif güçle DC kablosundaki iletim kayıplarını eşitlemelidir.

Transformatör

Dönüştürücüler AC sisteme trafo aracılığıyla bağlanmaktadır. Transformatörlerin en önemli görevi, AC sisteminin gerilimini dönüştürücüye uygun bir seviyeye getirmesidir.

Faz Reaktörleri

Faz reaktörleri, akımları düzenleyerek aktif ve reaktif güç akışını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Reaktörler ayrıca, VSC' lerin anahtarlama işleminden kaynaklanan AC akımlarının yüksek frekanslı harmonik içeriğini azaltmak için AC filtreler olarak da işlev görür.

AC Filtreler

AC gerilim çıkışı, IGBT' lerin anahtarlansından kaynaklanan harmonik bileşenleri içermektedir. AC sistem ekipmanının hatalı çalışmasına, radyo ve telekomünikasyon bozulmalarına sebep olduğundan dolayı AC sisteminde oluşan harmonikler sınırlandırılmalıdır. Bu yüksek mertebedeki harmonikleri azaltmak için yüksek geçiren filtre dalları yerleştirilmektedir.

DC Kapasitör

DC tarafında aynı boyutta iki kapasitör bulunmaktadır. Bu kapasitörlerin boyutu, gereken DC gerilimine bağlıdır. DC kapasitörlerin ana işlevi, geçici olaylar esnasında hem güç dengesini koruyup hem de DC taraftaki gerilim dalgalanmasını azaltmak için bir enerji tamponu oluşturmalarıdır.

DC Kablo

VSC-HVDC uygulamalarında kullanılan kablo, izolasyonun DC gerilimine karşı özellikle dirençli olan bir polimerden yapıldığı yeni geliştirilmiş bir kablodur. Polimerik kablolar, temel olarak mekanik mukavemeti, esnekliği ve düşük ağırlığı nedeniyle HVDC için tercih edilen seçimdir (Du, C., 2007).

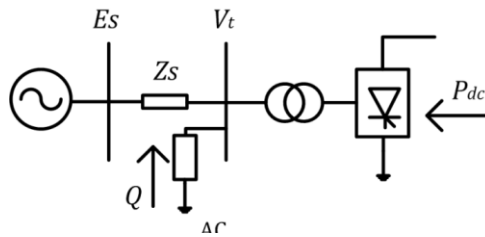
ZAYIF AC ŞEBEKELER

Güç sisteminin sonsuz barasından elektriksel olarak uzakta olan bir parçasına zayıf AC şebekeler denir. Çalışma koşulunda oluşan herhangi bir büyük değişiklik, önemli bir gerilim ve frekans sapmasına neden olduğundan sistem dengesiz duruma gelebilir. Güçlü AC şebekeleri zayıf AC şebekelerin tersine kararlı bir şekilde çalışmasını sürdürür. Ayrıca daha güçlü bir kapasiteye sahip güç talebine sahip olduklarından, gerilim, frekans ve diğer parametreleri belirli sınırlarda tutabilir. Zayıf AC şebekeye göre gerçekleşen bir arıza durumunda çalışma koşullarında oluşabilecek herhangi bir değişikliğe dayanıklılık gücü daha yüksektir.

Zayıf şebekeler, güçlü AC şebekelere göre düşük kısa devre seviyesine sahiptir. AC şebekesinin gücü Kısa Devre Oranı (SCR) ya da Etkin Kısa Devre Oranı (ESCR) kullanılarak belirlenir. SCR, AC barasındaki AC şebekesinin kısa devre görünür gücünün (MVA) AC / DC güç sistemlerinde nominal DC gücüne oranı ile bulunur. ESCR, AC filtrelerden dolayı reaktif güç üretimini dikkate almaktadır. SCR empedans sistemi ile ters orantılı olan karmaşık bir sayıdır. HVDC'li sistemler için SCR değerlerinin belli standartları bulunmaktadır. 2016 yılında yapılan B4.62 nolu çalışma grubu toplantısında 671 numaralı CIGRE broşüründe, güçlü şebekeler için SCR 3'ten büyük, zayıf AC şebekeler için SCR 3'ten küçük ve 2'den büyük ve çok zayıf şebekeler için ise SCR değerini 2'den küçük olarak kabul etmiştir. Bu belirtilen standartlar yüksek gerilim için uygundur (Nawir, M.H., 2017; Schmall, J., 2015).

Kısa Devre Oranı (SCR)

Bir HVDC uygulamasında, AC sisteminin gücünün DC sistemin gücüne göre parametrelendirilmesiyle AC ve DC sistemleri arasındaki etkileşim bulunmaktadır. AC veri yolundaki AC sisteminin kısa devre görünür gücünün (MVA) AC veri yolundaki anma DC gücüne oranı ile SCR değeri bulunmaktadır. AC baraya bağlı dönüştürücü modeli şekil 2' de gösterilmiştir (Zhou, J.Z. vd, 2013).



Şekil 2. AC Baraya Bağlı Dönüştürücü Modeli

Denklem 1' de belirtilen SCR formülünde, AC sisteminin Thevenin empedansı Z_s , anma DC gücü P_{dc} ve anma hattı RMS gerilimi ise V_t olarak gösterilir. SCR temel olarak AC sisteminin Thevenin empedansının bir ölçüsüdür. Devre parametreleri bilindiğinde basit bir devre analizi yapılarak Thevenin empedansı hesaplanır.

$$SCR = \frac{MVA_{ac}}{P_{dc}} = \frac{V_t^2 / Z_s}{P_{dc}} = \frac{1}{|Z_{eq}|} \quad (1)$$

VSC-HVDC SİSTEMİNİN KONTROL STRATEJİSİ

Bir VSC-HVDC sisteminin kontrolü temel olarak enerji transferinin kontrolünü ele alır. VSC-HVDC iletiminde kontrol, iletilen aktif ve reaktif gücün doğru kontrolünü amaçlar. Üstelik VSC kontrolleri AC şebekelerinin dinamiklerini iyileştirmek gibi yardımcı hizmetlerde de yaygın olarak kullanılır. VSC-HVDC iletim sistemlerinde güç transferi, klasik bir HVDC iletim sisteminde olduğu gibi kontrol edilir. İnverter tarafı aktif gücü kontrol

$$L \frac{di_d}{dt} = v_{s,d} - v_{c,d} - i_d R + i_q j\omega L \quad (4.a)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = v_{s,q} - v_{c,q} - i_q R - i_d j\omega L \quad (4.b)$$

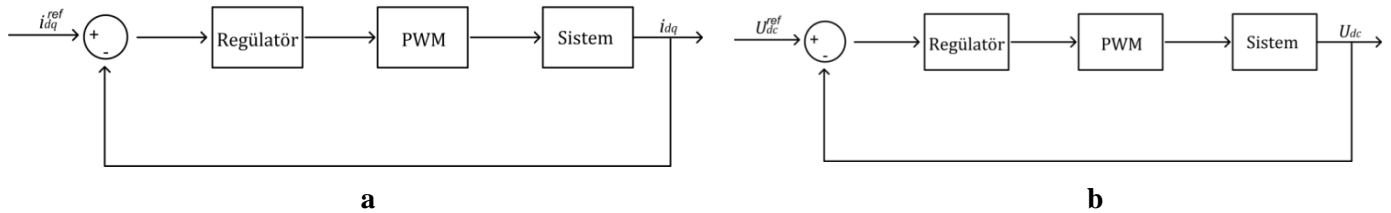
dq referans çerçevesi daha sonra $v_{s,d} = v$ ve $v_{s,q} = 0$ şeklinde hizalanabilir. AC ve DC taraf için aktif ve reaktif güç denklemleri 5 ve 6'da olduğu gibidir.

$$P_{AC} = v_{s,d} \cdot i_d, \quad P_{DC} = u_{DC} \cdot i_{DC} \quad (5)$$

$$Q_{AC} = -v_{s,d} \cdot i_q \quad (6)$$

İç ve Dış Akım Kontrolörleri

Giriş olarak iç kontrolör veya akım kontrol cihazı referans akımı ile ölçülen akım arasındaki hatayı alır. Bu hata PI regülatörü aracılığıyla taşınır. Sonuç olarak, dq referans çerçevesinde istenen dönüştürücü gerilimi elde edilir. İleri besleme, kademeli kontrolün yavaş dinamik tepkisinin dezavantajını en aza indirmek için kullanılır. İç döngü değişkenlerinin referans değerleri çoğu kez mevcut olduğundan, bunlar daha hızlı ve daha güvenli bir işlem için ileri beslenir. İç akım kontrolörünün blok diyagramı şekil 5.a' da verilmiştir.



Şekil 5. Akım Kontrolörleri Blok Şemaları a) İç Akım b) Dış Akım

PWM dönüştürücünün girişi, geçerli kontrol döngüsü tarafından üretilen ve dq' den dönüştürülen gerilim referansıdır. Dönüştürücü geriliminin referansı herhangi bir gecikme olmadan izleyeceği ve anahtarlamasının neden olduğu harmoniklerin faz reaktörleri ve AC filtreleri tarafından giderileceği varsayılabilir (Bahrman M, 2007) . Böylece, PWM' nin çalışması dq referans çerçevesinde aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$v_{c,dq} = v_{c,dq}^{ref} \quad (7)$$

Eşitlik 4.a ve 4.b' de sistem denklemleri verilmiştir. Bu denklemlerden faydalanarak regülatör bloğunun çıktısı şu şekilde olur:

$$v_{c,d}^{ref} = -(i_{d,ref} - i_d)F(s) + i_q(\omega L) + v_{s,d} \quad (8)$$

$$v_{c,q}^{ref} = -(i_{q,ref} - i_q)F(s) + i_d(\omega L) + v_{s,q} \quad (9)$$

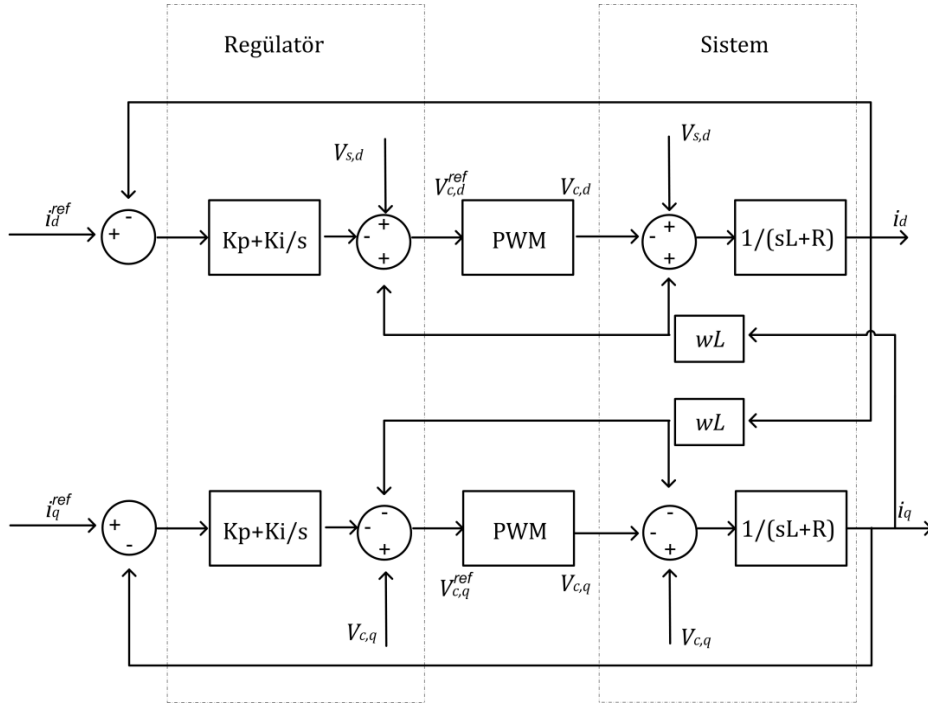
$$(i_{d,ref} - i_d)F(s)G(s) = i_d \quad (10)$$

$$(i_{q,ref} - i_q)F(s)G(s) = i_q \quad (11)$$

burada $F(s)$ ve $G(s)$ sırasıyla $F(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$, $G(s) = \frac{1}{sL + R}$ şeklindedir.

Dış kontrolör, aktif bir güç kontrolörü, DC voltaj kontrolörü, reaktif güç kontrolörü ve bir AC voltaj kontrolöründen oluşur. Dış denetleyicileri tasarlarken, istikrarı sağlayabilmek için dış kontrol döngüsünün iç kontrol döngüsünden daha yavaş olması gerekir. Dış kontrolörün blok diyagramı şekil 5.b'de gösterilmiştir (Lennerhag O. ve Träff V., 2013).

Tam akım kontrol cihazı blok şeması aşağıdaki Şekil 6' da gösterilmektedir.



Şekil 6. Detaylı Akım Kontrolör Yapısı

DC Gerilim Kontrolörü

DC geriliminin kontrolü, dönüştürücüler arasındaki güç dengesini sağladığından dolayı önemlidir. DC gerilim kontrolü bir PI regülatörü yardımıyla sağlanabilir. DC gerilim kontrolüne ait denklem aşağıdadır.

$$(u_{DC}^{ref} - u_{DC})(K_p + \frac{K_i}{s}) + \frac{u_{DC} i_L}{v_{s,d}} = i_d^{ref} \quad (12)$$

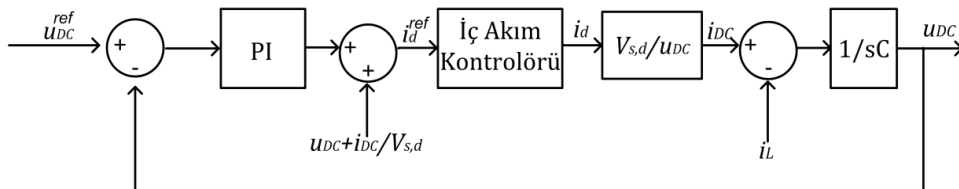
DC taraftaki akımla d eksenli akımını ilişkilendirmek için, daha önce 5 numaralı denklemde verilen DC ve AC taraftaki güçlerin aynı olduğu varsayılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$u_{DC} i_{DC} = v_{s,d} i_d \quad (13)$$

$$i_{DC} = \frac{v_{s,d} i_{DC}}{u_{DC}} \quad (14)$$

$$C \frac{du_{DC}}{dt} = i_{DC} - i_L \quad (15)$$

DC tarafın dinamikleri dikkate alarak DC gerilim kontrol cihazı, yukarıda verilen denklemle tanımlanır. Şekil 7’ de DC gerilim kontrolörünün blok şeması verilmiştir (Lennerhag O. ve Träff V., 2013).

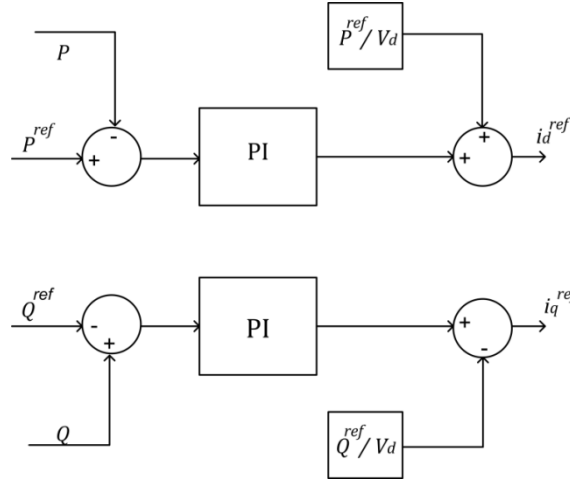


Şekil 7. DC Gerilim Kontrol Blok Şeması

Aktif ve Reaktif Güç Kontrolörleri

Aktif ve reaktif güçler, bir açık döngü kontrol cihazı kullanılarak basit bir şekilde kontrol edilebilir. Aktif ve reaktif güç kontrolüne ait dq eksenlerine ait mevcut referans akımlar 16 numaralı denklemde verilmiştir. Aktif ve reaktif güç kontrolörünün blok şeması Şekil 8.' de gösterilmiştir.

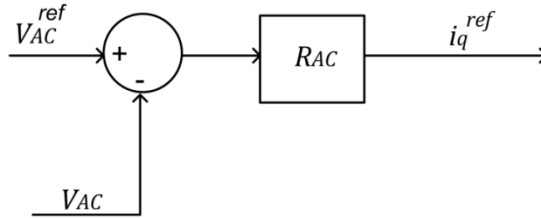
$$i_d^{ref} = \frac{P^{ref}}{v_{s,d}} \quad , \quad i_q^{ref} = \frac{Q^{ref}}{v_{s,d}} \quad (16)$$



Şekil 8. Aktif ve Reaktif Güç Kontrolör Blok Şeması

AC Gerilim Kontrolörü

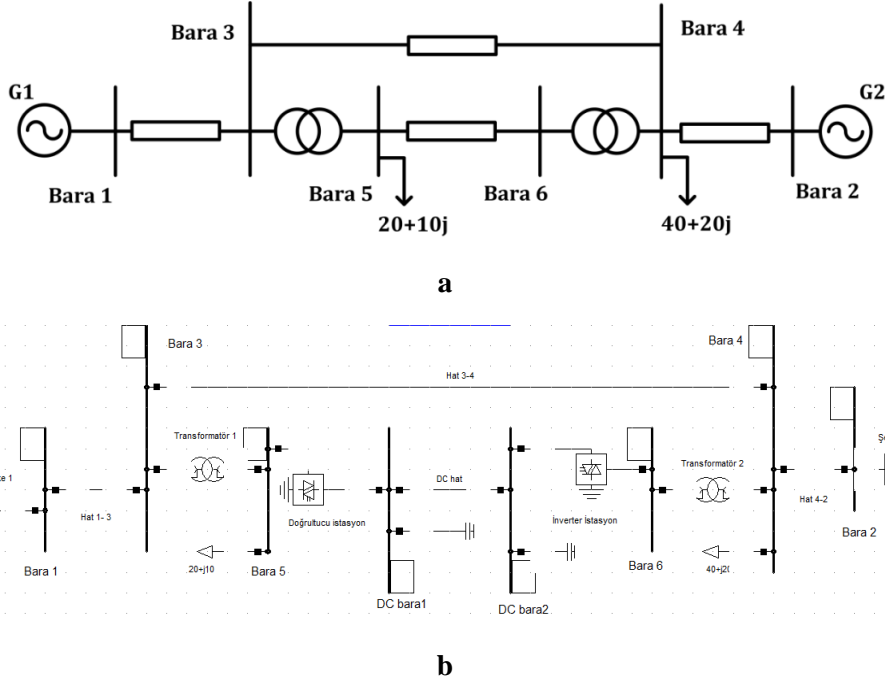
AC gerilimin büyüklüğü istenen seviyeden farklıysa, gerilimi arttırmak veya azaltmak için dönüştürücü tarafından reaktif güç üretilmeli veya tüketilmelidir. AC gerilimi referans değeriyle karşılaştırarak düzenleyebilir. Kontrolör çıkış sinyali olarak i_{qref} verir. AC gerilim kontrolörünün blok şeması şekil 9.' da gösterilmiştir (Lennerhag O. ve Träff V., 2013).



Şekil 9. AC Gerilim Kontrolör Blok Şeması

VSC-HVDC İÇEREN ZAYIF BİR AC TEST SİSTEMİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

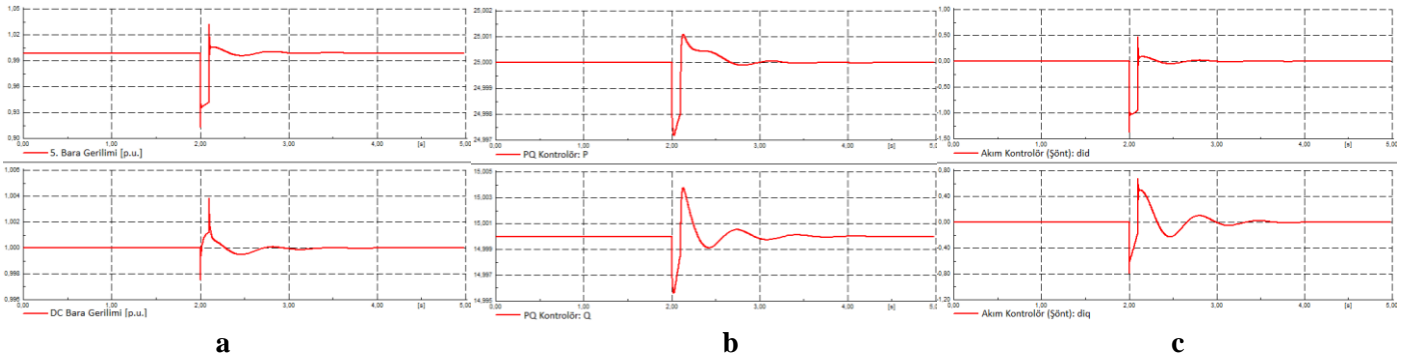
6 baralı test sisteminde 2 adet güç kaynağı, 6 adet bara, 2 adet yük ve 2 adet transformatör bulunmaktadır. Test sistemi Şekil 10.a' da gösterilmiştir. Şekil 10.b'de ise DIGSILENT ortamında kurulan 6 baralı test sistemi gösterilmiştir. Bu sistem HVDC' nin zayıf AC şebekeleri desteklediğini gösterebilmek için kurulmuştur. Sisteme ait veriler Ek.B' de verilmiştir. Buna göre SCR değeri 1.662 olarak hesaplanmıştır. SCR değeri 2 den küçük olduğundan çok zayıf şebekeli bir sistemi temsil etmektedir. VSC-HVDC 5. ve 6. bara arasına bağlanmıştır. 5. baraya bağlı dönüştürücü doğrultucu, 6. baraya bağlanan dönüştürücü inverter olarak kullanılmıştır. 4 ve 5 numaralı baralarda sırasıyla 40 ve 20'şer MW'lık aktif güç ile 20 ve 10'ar MVAR'lık reaktif güçler bulunmaktadır. Sistemin V/Q analizine bağlı en zayıf barası 5 numaralı baradır. Sırasıyla en zayıf barada 3 faz toprak hatası, VSC-HVDC üzerinden Aktif ve reaktif güçlerin adım artımları ile transferleri şeklinde simülasyonlar yapılmıştır.



Şekil 10 a) 6 Baralı Zayıf AC Şebeke b) DİGSİLENT Ortamında Kurulan 6 Baralı Sistem (Baldan, E., 2019)

En Zayıf Barada 3 Faz-Toprak Hatası

Zayıf AC sistemin en zayıf barası olan 5. barada 2. saniyede kısa devre hatası verilmiştir. Bu hata 2.1. saniyede temizlenmiştir. 5 saniyelik simülasyon yapıp HVDC' nin sisteme nasıl etki ettiği aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir Şekil 11.a' da gösterilen grafik hata durumunda 5. bara ve DC baranın gerilim değerlerinden oluşmaktadır. Üstteki grafikte 5. bara gerilimi 1 p.u. iken oluşan hata anında hızlı bir şekilde düşüp hata temizlendikten yaklaşık 1 saniye sonra yine 1 p.u. değerine ulaşmıştır. Altta grafikteki DC baranın gerilim değerlerinde ise 5. baranın aksine küçük bir azalma sonrası toparlanıp hata temizlendikten sonra küçük bir artma gösterip 1 pu. değerinde kaldığını görüyoruz. Doğrultucu kontrol modu VDC-Q olduğundan DC barayı kontrol altında başarıyla tutulmuştur. Şekilden bara gerilimlerinin kararlı hale ulaştığı gözlemlenebilir. Şekil 11.b' de gösterilen grafik hata durumunda P-Q kontrolörünün değerlerini göstermektedir. Aktarılmak istenen 25 Mw'lık Aktif güç ile 15 MW'lık reaktif güçler hata esnasında bozulup hata temizlendikten sonra kısa bir varyasyon gösterip kendini 2 saniyeden daha az bir süre içerisinde toparlamış ve sisteme transferi gerçekleştirmiştir. Şekil 11.c'deki iki grafik de birbirinden farklıdır.

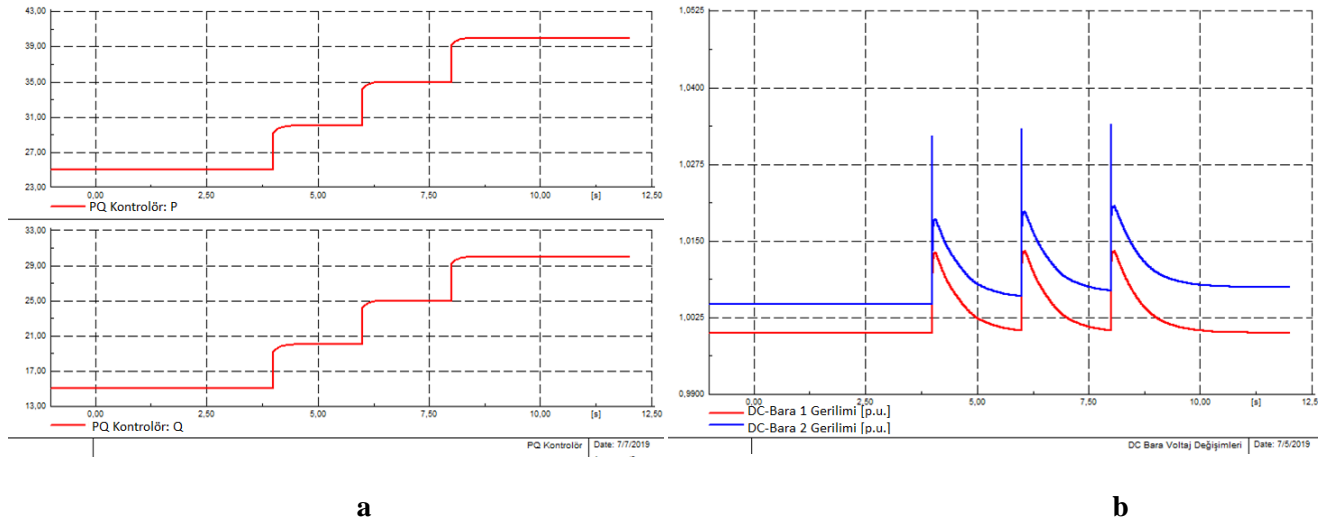


Şekil 11. 3 Faz-Toprak Hatası Sonucunda a) 5 Numaralı Bara Gerilimi (Üst)-VSC-HVDC DC Gerilim Değişimi (Alt) b) VSC-HVDC P-Q Kontrolör Değişimleri c) VSC-HVDC Akım Kontrolör Değişimleri

Reaktif gücün q eksenini akım bileşenlerine bağlı olduğu, aktif gücün d eksenini akım bileşenine bağlı olduğu grafiklerdeki farklılıklardan görülmektedir. Bu üç grafikten de anlaşılacağı üzere bir kısa devre hatası gerçekleştiğinde HVDC yapısı ve oluşturulan kontrolörler sayesinde sistem kendini en kısa zamanda toparlayıp çalışmaya devam edebilmiştir. Kontrol altında tutulmak istenen elemanlar kontrol edilebilmiştir.

AC Sisteme Transfer Edilen Aktif ve Reaktif Güçlerin Adım Artımları

Bu kısımda zayıf AC sisteme transfer edilmek istenen aktif ve reaktif güçlerde adım artımları yapılarak vektör kontrollü VSC-HVDC'nin performansı araştırılmıştır.



Şekil 12. Vektör Kontrollü VSC-HVDC'nin a) Aktif ve Reaktif Güçlerin Adım Artımları b) DC Gerilim Değişimleri

Şekil 12.a' da transfer edilmek istenen aktif ve reaktif güç değerleri gösterilmektedir. Aktif güç her iki saniyede 25 MW'tan 5'er MW'lık adım artımı ile 8. Saniye sonunda 40 MW'a ulaşmıştır. Benzer şekilde reaktif güç değeri de her iki saniyede 15 MW'tan 5'er Mvar'lık adım artımı ile 8. Saniye sonunda 30 Mvar değerine ulaşmıştır. Güçlerin artırılmasıyla DC baranın nasıl tepki verdiği şekil 12.b' de verilmiştir. Adım adım yapılan artışlara rağmen DC bara gerilim değeri 1 p.u. degerinde kalabilmiştir.

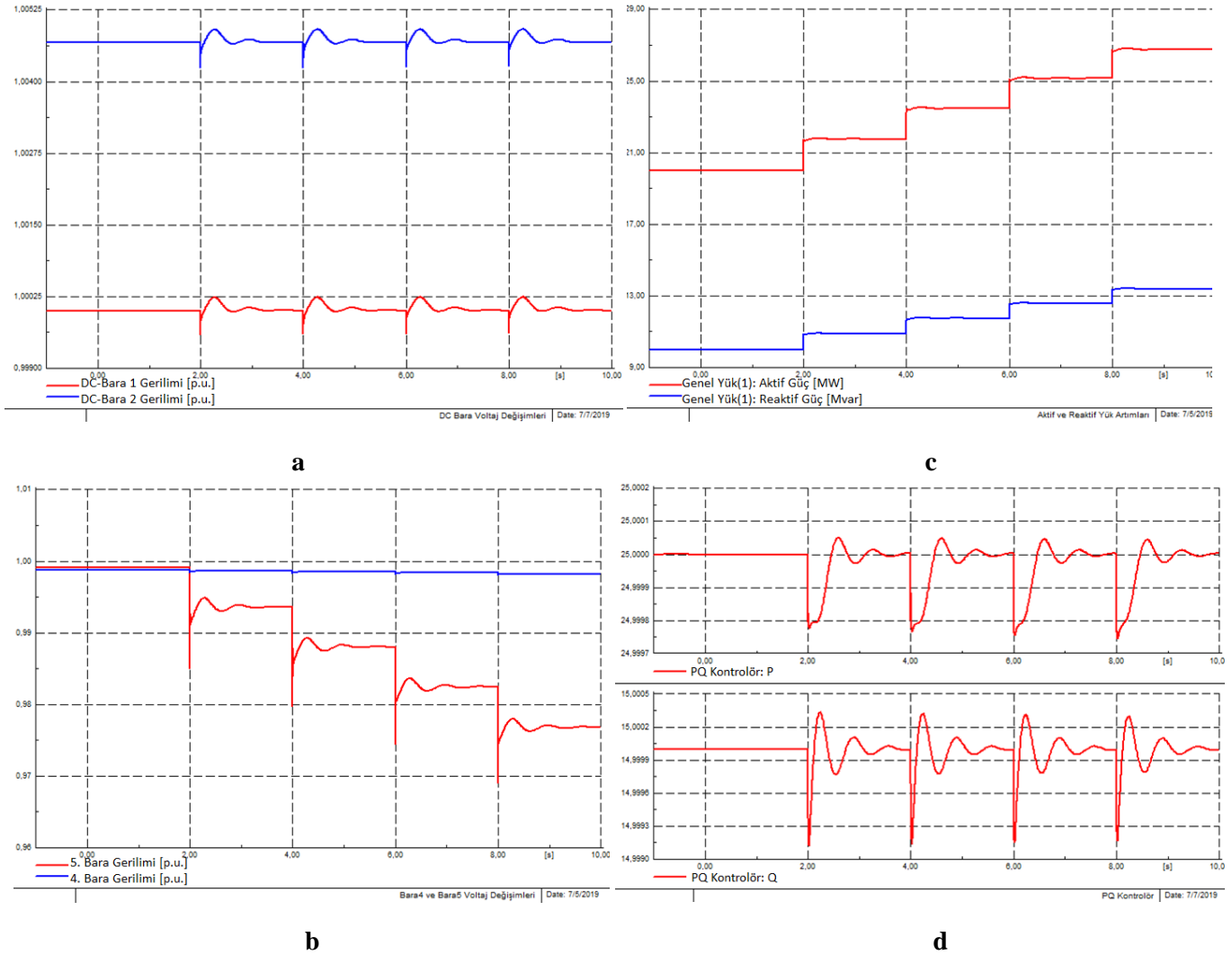
En Zayıf Barada Aktif ve Reaktif Güçlerin Adım Artımları

Bu kısımda zayıf AC sistemin en zayıf barası olan 5 numaralı barada aktif ve reaktif güç artımları senaryosu düşünülmüştür. Bu simülasyon sonrasında vektör kontrollü VSC-HVDC'nin performansı araştırılmış ayrıca 5 numaralı baradaki gerilim değişimleri çizdirilmiştir. Şekil 13 a'da 5. baradaki aktif ve reaktif yük artışlarının DC bara gerilimindeki etkileri görülmektedir. Bu grafikten açıkça anlaşılmaktadır ki yük artımları neticesinde kontrolör DC bara gerilimlerinde kararlılığı sağlayabilmiştir. DC bara gerilimleri yük artımına rağmen değerlerini koruyabilmiştir Şekil 13 b.' de ise yük artımı sonucu elde edilen AC sisteme ait 4. ve 5. baranın gerilim değerleri görülmektedir. 5. bara yük artımının olduğu bara olduğundan 5. bara geriliminde değer olarak az da olsa hızlı bir düşüş görmekteyiz. 4. bara ise diğer taraftaki reaktif gücün değişiklik göstermemesinden dolayı bir değişiklik göstermez. Şekil 13 c.'de , 5 numaralı barada bulunan 20 Mw'lık aktif güç ve 10 Mvar'lık reaktif yükün her iki saniyede kademe kademe adım artımları sonucunda 8. Saniye sonunda 27 MW ve 13.5 Mvar değerine geldiği görülebilir. Aktarılmak istenen güçler PQ kontrolörü tarafından korunmayı başarmış ve sistem kararlılığını koruyabilmeyi başarmıştır. Şekil 13 d.' ise PQ kontrolörün performansı görülebilir. En zayıf barada yük artımlarının gerçekleşmesi durumunda bile vektör kontrollü VSC-HVDC 'nin PQ kontrolörü her adım artımı sonrasında kısa bir süre tepki vermiş sonra toparlanarak sisteme sırası ile ayarlanan 25 MW aktif ve 15 Mvar reaktif güç değerlerini aktarabilmiştir.

SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışma zayıf bir AC şebekeye bağlı (VSC) tabanlı HVDC iletim sisteminin vektör kontrolü yöntemine dayalı dinamik performansını araştırmaktadır. Öncelikle dq referans çerçevesinde AC ve DC tarafların matematiksel modellerinden faydalanmak sureti ile iç ve dış akım kontrol çevrim blokları oluşturularak, birbirlerinden bağımsız Aktif –Reaktif Güç Kontrolünün yanı sıra AC ve DC gerilim kontrolü gerçekleştirilmiştir. DiGSILENT ortamında gerçekleştirilen test sistemi üzerinde kısa devre hatası, yük artımı, transfer edilen gücün adım adım artırılması gibi bozucu etki verilerek sistemin tepkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; DC hattın bağlandığı DC baraların gerilimi bozucu etkilere rağmen referans değerine geri dönebilmiş, aktif ve reaktif güç değerleride kısa sürede arzu edilen seviyelere ulaşmıştır. İncelenen bazı baralarda gerilim azalması görülmüştür ki bu beklenen

bir durumdur. Simulasyon sonuçları, vektor kontrollü VSC-HVDC'nin dinamik performansının ve sistem geçiş karakteristiğinin oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 13. a) 5 Numaralı Barada Aktif ve Reaktif Güçlerin Adım Artımları **b)** AC Sistemde 4 ve 5. Baraların Gerilim Değişimleri **c)** VSC-HVDC'nin P-Q Kontroller Değişimleri **d)** VSC-HVDC'nin DC Baralarına ait Gerilim Değişimleri

KAYNAKLAR

A. J. Agbemuko, J. L. Dominguez-Garcia, O. Gomis-Bellmunt, and L. Harnefors (2020. March), Passivity-based analysis and performance enhancement of a vector controlled VSC connected to a weak AC grid, *IEEE Trans. Power Del.*, early access, Mar. 23, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2982498.

Abacı, K. Yamaçlı, V. Baldan, E. (2019, Nisan) Zayıf AC Şebekelerde VSC-HVDC ile sürekli hal kararlılığı ve Aktif-Reaktif Güç kapasite eğrilerinin incelenmesi. 6th Multidisciplinary Studies Congress. International Conference (MULTICONGRESS) (pp.205-217).

Aouini, R., Marinescu, B., Kilani, K. B., & Elleuch, M. (2017). Stability improvement of the interconnection of weak AC zones by synchronverter-based HVDC link. *Electric Power Systems Research*, 142(January), 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.09.005>

Bahrman M, Johnson, B.K. (2007). The ABCs of HVDC transmission technologies magazine. *IEEE Power & Energy magazine*. Vol. 5 (2).32-44. <http://doi.org/10.11091/MPAE.2007.329194>

- Baldan, E. (2019). Gerilim Kaynağı Dönüştürücülü HVDC İletim Sistemlerinin Aktif ve Reaktif Güç Sınırları Eğrisinin İncelenmesi. Yüksek lisans tezi. Mersin üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilimdalı. Mersin Üniversitesi. 84s
- Daniel Perez Dorantes, Jose Luis Monroy Morantes, (2013, November). 3D-SVPWM Vector Control of a VSC-HVDC Transmission System., IEEE International autumn Meeting on Poer, electronics and Computing(ROPEC), page1-6 doi:10.1109/ROPEC.2013.6702745
- Davari, M. & Mohamed, Y. A. R. I. (2017). Robust vector control of a very weak-grid-connected voltage-source converter considering the phase-locked loop dynamics. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 32(February), 977-994. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2546341>
- Dasgupta, S. Agnihotr, G. (2009, December). A control Strategy for a VSC HVDC System in steady state response.. International Conference on Advances in Computing, Control and Telecommunication Technologies (ACT). doi:10.1109/ACT.2009.143.IEEE.
- Du C. (2007). VSC-HVDC for industrial power systems. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- Egea-Alvarez A., Barker, C. Gomis-Bellmunt O., & Hassan F. (2015, February). Capability curves of a VSC-HVDC connected to a weak AC grid considering stability and power limits In 2015 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (IET) (pp. 1-6). doi:10.1049/cp.2015.0091. IEEE.
- Franken, B., & Andersson, G. (1990). Analysis of HVDC converters connected to weak AC systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(February), 235-242. <https://doi.org/10.1109/59.49111>
- G. Tianyi., Xin zhao, Wenjing Zheng, Liu, H., Liu, Y. And Quiye Sun. (March, 2022), Improved Sliding mode Vector Control Strategy combined with extended Reactive Powwer for MMC Under Unbalanced Grid Condition, frontier in Energy research., Sec. Smart Grids Vol. 10. 1-12 <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.874533>
- Gengyin Li, Ming Zhou, Chengyong Zhao, (2006,June). Modelling of VSC-HVDC and control strategies for supplying both active and passive systems, IEEE Power Engineering Society General Meeting (PES). IEEE. doi:10.1109/PES.2006.1708897
- Kalitjuka, T. (2011). Control of Voltage Source Converters for Power System Applications. Master of Science in Electric Power Engineering. Norwegian University of Science and Technology. 69s
- Lennerhag O, Träff V. (2013). Modelling of VSC-HVDC for Slow Dynamic Studies. Master's Thesis in Electric Power Engineerinf. Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden 102s.
- Long W, (2007). *HVDC transmission: yesterday and today*.Magazine SN-IP and E, .. EthwOrg n.d..
- Nawir, M.H.,(2017). Integration of Wind Farms into weak AC Grids . PhD thesis. Cardiff University. 173s
- Pan J, Nuqui R, Srivastava K, Johnsons, T. Holmberg, P. &Hafner, Y.J. (2008,November). AC grid with embedded VSC-HVDC for secure and efficient power delivery. In 2008 IEEE Energy 2030
- Raath, Prabodha Kumar, Bhuyan, K.C., (2018). Vector Control of VSC HVDC System under Single Line to Ground Fault Condition. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)* Vol.7 (1) <http://doi.org/10.11591/ijape.v7.i1.pp59-64>
- Schmall J, Huang, S., & Li, Y. (2015, July). Voltage stability of large-scale wind plants integrated in weak networks: An ERCOT case study. doi:10.1109/PESGM.2015.7286224.IEEE
- Serpa, L.A., Kolar, J.W. , Ponnahiri, S., & Barbosa, P.M. (2005). A modified direct power control strategy allowing the connection of three phase inverter to the giid through LCL filters. IEEE Industry Applications Society Transactions on.Vol.1.(November). 565-571. <https://doi.org/10.1109/TAS.2005.1518363>
- Shuaihu li, canle cao, zhenyu Xiang,(2019, November), An Improved Vector Control strategy of VSC-HVDC Connected to Weak power Grid”, IEEE conference on energy internet and energy System Integration (E12). IEEE. doi:10.1109/E1247390.2019.9062034

Sood, V., Hiteshkumar Patel, (2010, December,). Comparison between Direct and Vector control Strategy for VSC-HVDC system in EMTP-RV. International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth(PEDES) doi:. 10.1109/PEDES.2010.5712550, India

Stamatiou G., (2015) Converter interactions in VSC-based HVDC systems Lisans Tezi, Chalmers University of Technology , Department Energy of Environment, Gothenburg, Sweden 222s.

Xia, X., Xu, L., Zhao, X., Zeng, X., and Yi, H. (2021). Modular Multilevel Converter Predictive Control Strategy Based on Energy Balance. *Journal Power Electron.* 21. doi:10.1007/s43236-021-00225-9

Xiaojun, Lu. Xiang, Wang, Lin, Weising and Wen, J.,(2021, August), Comparative Study of Small-Signal Stability Under Weak AC System Integration for Different VSCs, *IEEE Journal of Emerging and selected Topics in power Electronics*, Vol. 9, No. 4, August 4482-4499 <https://ieeexplore.ieee.org>. Digital Object Identifier 10.1109/JESTPE.2020.3024196

Yakupoğlu, H. (2019). Sinüs-cosinüs algoritması ile optimize edilmiş modüler çok seviyeli dönüştürücü tabanlı HVDC sisteminin aktif güç kontrolü ve Arıza analizi. Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Ankara 115s.

Zhou, J.Z, Gole, A.M. (2013, July). Estimation of the Short Circuit Ratio and the Optimal Controller Gains Selection of a VSC System. International Conferences on Power System Transients. (IPST2013)

EKLER

A. $\alpha\beta$ Durağan Koordinat Sisteminin dq Koordinat Sistemine Dönüşümü

$\alpha\beta$ koordinat sisteminde $u(\alpha\beta)$ vektörü için pozitif yönde dönen bir $w(t)$ açısal hız, dq koordinat sistemi için de tanımlanabilir. $u(\alpha\beta)(t)$ vektörü, bu dönen referans çerçevesinde sabit vektörler olarak görünecektir. Şekil Ek A.1’ de gösterildiği gibi, d eksenini ve q eksenini üzerinde $u(\alpha\beta)(t)$ vektörü dq çerçevesini gösterir. [Stamatiou, G., 2015] Dönüşüm vektörel formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

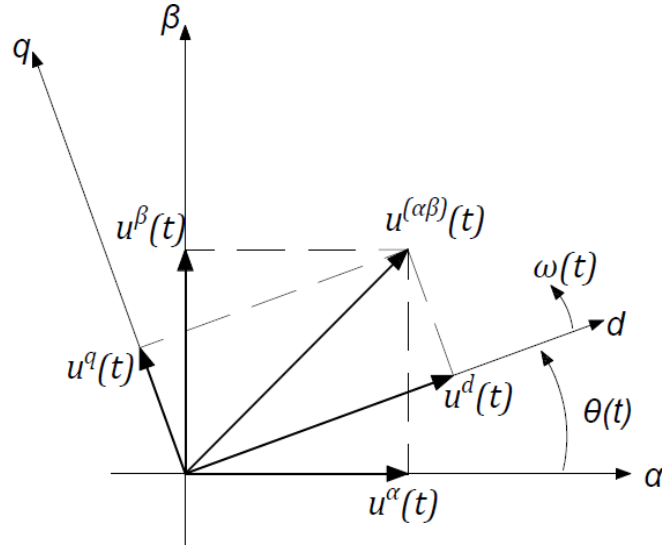
$$u^{(dq)}(t) = u^d(t) + ju^q(t) = u^{(\alpha\beta)}(t)e^{-j\theta(t)} \quad (\text{Ek A.1})$$

Şekil Ek A.1’de gösterilen $\theta(t)$ açısı aşağıdaki gibi ifade edilirse

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t w(\tau) d\tau \quad (\text{Ek A.2})$$

$\alpha\beta$ koordinat sisteminden dq koordinat sistemine ters dönüşüm yapılarak geçilebilir.

$$u^{(\alpha\beta)}(t) = u^{(dq)}(t)e^{j\theta(t)} \quad (\text{Ek A.3.})$$



Şekil Ek A.1. $\alpha\beta$ Durağan Koordinat Sisteminin $-dq$ Koordinat Sistemine Dönüşümü

$\alpha\beta$ koordinat sistemi ile dq koordinat sistemi arasındaki ilişkiler matrisel formda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} u^d(t) \\ u^q(t) \end{bmatrix} = R(-\theta(t)) \begin{bmatrix} u^\alpha(t) \\ u^\beta(t) \end{bmatrix} \quad (\text{Ek A.4.a})$$

$$\begin{bmatrix} u^\alpha(t) \\ u^\beta(t) \end{bmatrix} = R(\theta(t)) \begin{bmatrix} u^d(t) \\ u^q(t) \end{bmatrix} \quad (\text{Ek A.4.b})$$

Burada çarpım matrisi $R(\theta(t))$ aşağıdaki gibidir.

$$R(\theta(t)) = \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & -\sin(\theta(t)) \\ \sin(\theta(t)) & \cos(\theta(t)) \end{bmatrix} \quad (\text{Ek A.5b})$$

B. Test Sistemine ait Parametreler

Çalışmada kullanılan 6 baralı test sistemine ait parametreler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Değişkenler			R	X
VSC-HVDC	Güç	600 MVA		
	AC gerilim	52 kV		
	DC gerilim	100 kV		
Hatlar	DC kablo	100 km	3.76 Ω	5.937 Ω
	AC (1-3)	20 km	0.2 Ω	1.6 Ω
	AC (2-4)	1 km	0.02 Ω	0.5 Ω
	AC (3-4)	100 km	0.1 Ω	0.2 Ω
Transformatörler	Tr-1 ve Tr-2	220/52 KV		j0.1 p.u