



## 750 V DC Beslemeli Bir Demiryolu Cer Merkezinde Güç Kalitesi Probleminin UVDGM Bazlı DSTATKOM İle Çözülmesi

### Solving Power Quality Problem of 750 V DC Railway Substation With DSTATCOM Using SVPWM

Mehmet Taciddin Akçay<sup>1</sup> , İlhan Kocaarslan<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Raylı Sistem Daire Başkanlığı, İstanbul, TÜRKİYE

<sup>2</sup> TUVASAŞ, Türkiye Vagon Sanayii, 54100 Adapazarı, Sakarya, TÜRKİYE.

**Başvuru/Received:** 26/02/2019

**Kabul/Accepted:** 18/04/2019

**Son Versiyon/Final Version:** 30/06/2019

#### Öz

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı çok önemlidir. Tek fazlı ve çok fazlı elektrik sistemlerinde oluşabilecek herhangi bir arıza durumu ya da gerilim düzensizliğine neden olabilecek başka bir durum güç kalitesini olumsuz etkilemektedir. Demiryollarında gerilim kararlılığı işletme sürekliliğinin sağlanması açısından kritiktir. DC beslemeli raylı sistemlerde, DC gerilim trafo merkezlerinde bulunan AC şebeke geriliminden elde edildiği için AC bölümde oluşabilecek herhangi bir olumsuz durum DC gerilimi de etkilemektedir. Bu çalışmada 750 V DC beslemeli bir demiryolu hattında oluşabilecek güç kalitesi probleminin UVDGM (Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu) bazlı Dstatkom (Dağıtım Sistemi Statik Senkron Kompanzator) ile çözülmesi araştırılmıştır. Çalışma için trafo merkezinde oluşabilecek arıza durumunun benzetimi yapılarak gerilim düzensizliği problemi Dstatkom ile ortadan kaldırılmıştır. Benzetim sonuçları ile ilgili olarak AC ve DC gerilimlere ait analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilerek sağlanan iyileştirme durumu ortaya konulmuştur.

#### Anahtar Kelimeler

“*Cer, DC, Demiryolu, Güç, UVDGM*”

#### Abstract

Voltage stability in power systems is critical. The fault or any case cause voltage instability that may occur in three-phase and single-phase electrical power systems emerge power quality problems. Voltage stability in railways is important because of the operation continuity. The fault that occur in the AC part of the system may affect also DC voltage due to the usage of the AC grid for the generation of the DC voltage in substations. In this study, solving power quality problem of 750 V DC railway substation with Dstatcom (Distribution Static Synchronous Compensator) using SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) is investigated. The fault that may occur in the substation is simulated and the voltage stability problem is eliminated with Dstatcom. Comparative analyzes results are given for the AC and DC voltage about the simulation findings and the improvement of the system is revealed.

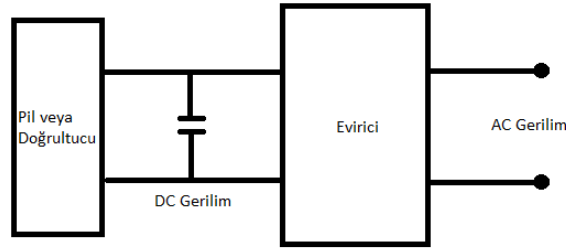
#### Key Words

“*DC, Power, Railway, SVPWM, Traction*”

## 1. Giriş

Elektrik iletim sisteminin en temel fonksiyonu tüketicie ve ilgili ekipmanlara iletilen gerilimin sinusoidal bir şekilde olmasıdır. Ekipmanların sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için bu gerilimin belirli limitler içerisinde kalması gerekmektedir. Demiryollarında işletme anında sürekliliğin sağlanabilmesi ve herhangi bir arıza ya da kesinti durumu yaşanmaması açısından gerilim kararlılığı çok önemlidir. Demiryollarında sağlanması gereken gerilim seviyeleri EN 50163 standardında tarif edilmiştir. DC beslemeli demiryollarında aracın ihtiyacı olan DC gerilim cer merkezlerinde şebekeden temin edilen AC gerilim ile sağlanmaktadır. Bu nedenle AC bölümde meydana gelebilecek herhangi bir olumsuz durum DC sistemle beslenen tüm ekipmanları da etkilemektedir. 750 V DC ile beslenen demiryollarında 34.5 kV AC şebeke besleme gerilimi cer merkezlerinde bulunan transformatörler yardımıyla 12.2 kV AC gerilime dönüştürülmektedir.

UVDGM yöntemi dijital uygulama kolaylığı ve efektif DC bara kullanımından ötürü diğer yöntemlere kıyasla tercih edilmektedir (Khan, 2015). Bu yöntem gerçek zamanlı modülasyon yöntemlerinden biri olup eviricide istenen genlikte ve frekansta üç faz gerilimler elde edilebilmektedir (Saygın & Kerem, 2017). Dstatkom elektrik iletim ve dağıtım güç sistemlerine paralel bağlanabilen ve reaktif enerji problemleriyle enerji kalitesi problemlerinde kullanılan ekipmanlardır (Ertay vd., 2016). 5 Seviyeli kaskat H-köprü eviricili uygulamalar statkom bazlı uygulamalarda güç kalitesini artırmak için kullanılmaktadır (Venkatesh vd., 2017). Güç kalitesi probleminin temelini gerilim ve akım düzensizlikleri oluşturmaktadır (Chang vd., 2009). Güç kalitesi problemlerinden biri de şebekeye bağlanan lineer olmayan yüklerdir (Jadeja vd., 2016). DGM bazlı çok seviyeli eviriciler ile kontrol AC dalga formunda bulunan harmoniklerin azaltılmasında kullanılan verimli bir yöntemdir (Balamurugan vd., 2016). UVDGM'nin temel prensibi güç sisteminde DC baraya bağlı gerilim kaynaklı evirici ile kontrol edilebilen AC gerilimin üretilmesidir (Murali vd., 2017).. UVDGM yönteminde minimum DC gerilim maksimum hat gerilimine göre belirlenir (Chen, 2016). Çok seviyeli DGM yöntemlerinde birden fazla taşıyıcı dalga kullanılabilir (Galvan, 2006). Çok taşıyıcı DGM kapasitör geriliminin daha kararlı olmasını sağlamaktadır (Anish vd., 2012). UVDGM yöntemi anahtarlama kayıplarını azaltmak için kullanılmaktadır (Giridharan vd., 2011). UVDGM metodunda endüstriyel uygulamalar için çeşitli evirici çıkış voltajları tercih edilebilmektedir (Ananth vd., 2012).



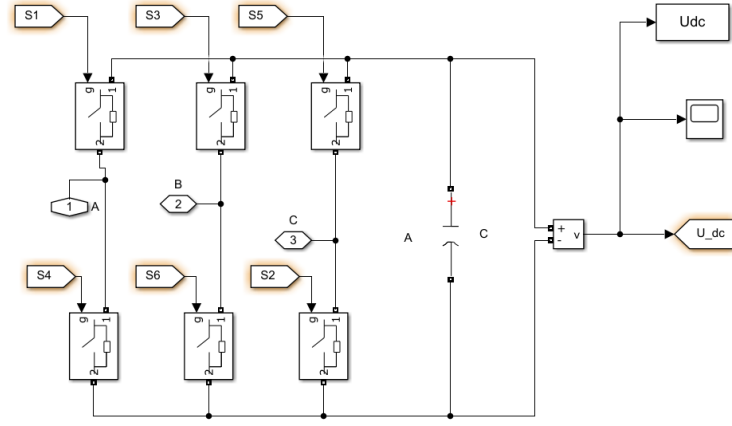
Şekil 1. Evirici Sistemine Ait Şematik Çizim (Ananth vd., 2012).

Dstatkom kaynağa paralel bağlı, dağıtım sistemleri için voltaj düzenlemesi, güç faktörünün iyileştirilmesi, yükün dengelenmesi ile harmoniklerin kompanze edilmesi için kullanılan evirici bazlı bir ekipmandır (Deniz vd., 2011). Son yıllarda bu cihazlar dağınık güç üretim sistemlerinde ve yenilenebilir enerji uygulamalarında anahtar bir çözüm haline gelmiştir. Statkom reaktif gücü kontrol etmek için de kullanılmaktadır (Salem vd., 2017), (Iswariya vd., 2015).

Bu çalışmada 750 V DC beslemeli bir demiryolu hattında oluşabilecek güç kalitesi probleminin UVDGM bazlı Dstatkom ile çözülmesi matlab/simulink yardımıyla yapılmıştır. Benzetim sonuçları grafiklerle verilerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Benzetimle ilgili iyileştirme durumu sonuçlarla ortaya konulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot

Dstatkom kaynakla aynı frekansta reaktif güç alıp gönderebilen kaynakla ortak bağlantısı olan güç ekipmanıdır. Dstatkom güç devresinde bir evirici, akımları filtreleyen bir aygıt ve DC voltaj için kondansatörler bulunmaktadır. Gerilim tabanlı eviricilerinde kullanılan uzay vektör modülasyon yönteminde, evirici tarafından üretilen üç faz gerilimler  $\alpha$ - $\beta$  düzleminde referans uzay gerilimler olarak üretilerek hesaplamalar yapılmaktadır. Şekil 2'de üç fazlı altı anahtarlı eviriciye ait devre gösterilmektedir.



Şekil 2. Altı Anahtarlı Üç Fazlı Evirici Devresi

UVDGM yönteminde üç faz gerilimlere ait anlık değerler kullanılarak uzay vektörlerin genliği ve faz açısı hesaplanmaktadır.

Üç fazlı evirici çıkış voltajına ait uzay vektörüne ait denklem (1) ile verilmektedir.  $V_s$  kaynak gerilimini,  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  ise üç faza ait gerilimleri ifade etmektedir.

$$\bar{V}_s^* = \frac{2}{3}(V_a + \bar{a}V_b + \bar{a}^2V_c) \quad (1)$$

$\bar{a}$  ifadesi (2) ile gösterilmektedir. Uzay vektörü sayesinde üç faz sistemler eşzamanlı olarak gösterilebilmektedir [8].

$$\bar{a} = e^{(j\frac{2\pi}{3})} \quad (2)$$

Her bir faza ait faz-nötr gerilimlerine ait açılımlar ise (3), (4) ve (5) ile verilmektedir. Yıldız noktası n ile ifade edilmiştir.

$$V_A = V_a + V_{nN} \quad (3)$$

$$V_B = V_b + V_{nN} \quad (4)$$

$$V_C = V_c + V_{nN} \quad (5)$$

(3), (4) ve (5) ifadelerinden (6) eşitliği elde edilmektedir.

$$V_{nN} = \left(\frac{1}{3}\right)(V_A + V_B + V_C) \quad (6)$$

Üç faza ait gerilimlerin uzay vektörleri biçiminde ifadesi ise (7) ile verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Statkom çalışma durumunda AC akımın genliği (8) ile gösterilmektedir.

$$I = (V_0 - V)/X \quad (8)$$

X transformatörün kaçak reaktansını ifade etmektedir. Statkom tarafından üretilen reaktif güç ise (9) ile verilmektedir.

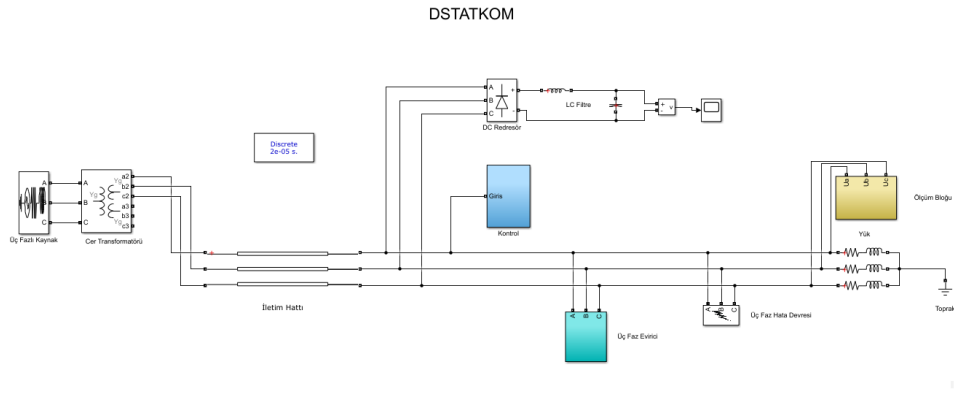
$$Q = \frac{V}{X}(V - V_0 \cos \varphi) \quad (9)$$

Statkom'daki aktif gücün giriş-çıkışı eviricinin çıkışındaki voltajın AC kaynak voltajına göre fazın kaydırılması ile kontrol edilir [3]. Aktif güç denklemi (10) ile verilmektedir.

$$P = \frac{VV_0 \sin \alpha}{X} \quad (10)$$

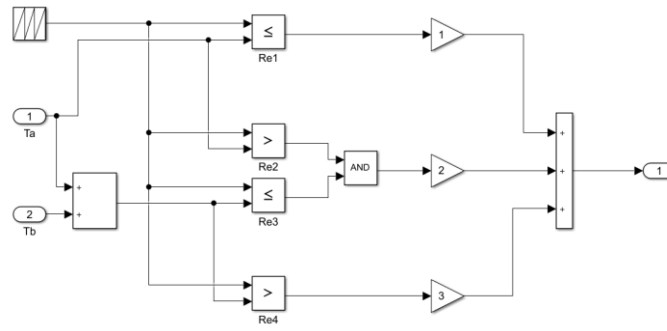
### 3. Bulgular

Bu çalışmada UVDGM bazlı Dstatkom benzetimi yapılmıştır. Şehir içi raylı sistem hatlarında genellikle 750 V DC ve 1500 V DC besleme gerilimleri tercih edilmektedir. Benzetim için 750 V DC beslemeli bir demiryoluna ait cer merkezinden yararlanılmıştır. Şekil 3'de benzetim için kullanılan devreye ait modelleme gösterilmektedir.



Şekil 3. Dstatkom Devre Modeli

Benzetim için 33 kV kaynak gerilimi, cer merkezi için 33 kV/0.6 kV cer transformatörü, iletim hattı, DC gerilimin elde edildiği redresör sistemi, üç faz hata devresi, yük devresi, UVDGM sistemi için kontrol bloğu ve ölçüm blokları kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı 3 kHz seçilmiştir. Şekil 4 ile tetikleme sinyallerinin üretildiği bölüm verilmektedir.



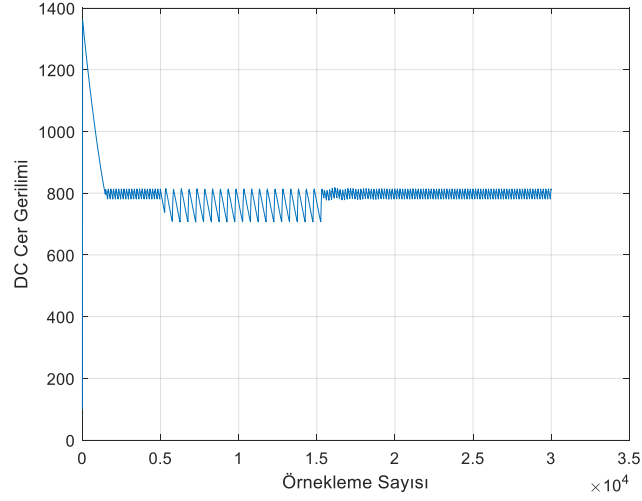
Şekil 4. Tetikleme Sinyallerinin Üretilmesi

UVDGM yöntemi için referans sinyaller bu kısımda üretilmektedir. Benzetim için örnekleme sayısı daha etkili bir sonuç almak için  $3e4$  seçilmiştir. Tablo 1'de cer merkezi için önerilen statkom'a ait tasarım parametreleri verilmektedir.

Tablo 1. Cer Merkezi İçin Statkom Parametreleri

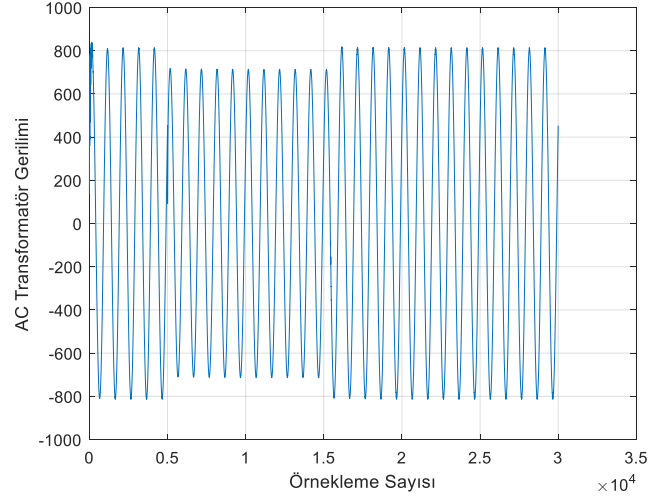
Parametre	Değer
Kaynak Gerilimi $V_k$	33 kV $V_{rms}$ Faz-Faz
Kaynak Frekansı	50 Hz
Kaynak Empedansı ( $R_k, L_k$ )	1e-1 $\Omega$ 7.6e-1 H
Yük Empedansı ( $R_y, L_y$ )	5e-1 $\Omega$ 6.25e-2 H
Üç Faz Hata Direnci ( $R_h$ )	10 $\Omega$
Statkom Anahtarlama Frekansı	3 kHz
Statkom Histerizis Bant Aralığı	2 V
Cer Transformatörü Çevirme Oranı	55
Redresör Filtresi ( $L_f, C_f$ )	1e-4 H 0.8e-6 F

Cer merkezinde gerçekleşecek bir üç faz hata olayında statkom kullanıldığı durum ve kullanılmadığı durumlar ayrı ayrı analiz edilerek DC besleme gerilimi ve AC transformatör çıkış gerilimlerinin değişimi incelenmiştir. Şekil 5 ve şekil 6 ile statkomsuz durumlara ait gerilim grafikleri verilmiştir.



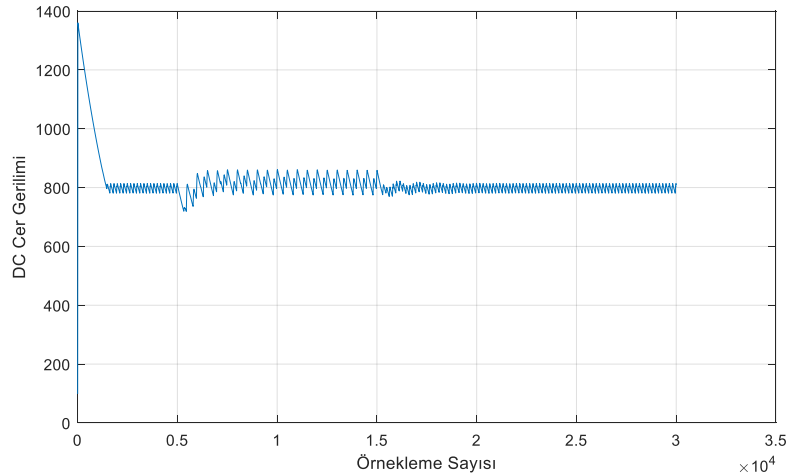
**Şekil 5.** Cer Merkezi DC Besleme Gerilimi (Statkomsuz)

Grafikte görüldüğü üzere hata durumunda DC gerilim 750 V seviyelerine kadar düşmüştür. Üç faz hata durumu 0.1-0.3 saniyeleri arasında gerçekleşmektedir. Bu gerilim değeri cer besleme merkezinin boшта gerilimine ait değer olduğu için raylı 624system işletmesini olumsuz etkileyecek bir durumdur.



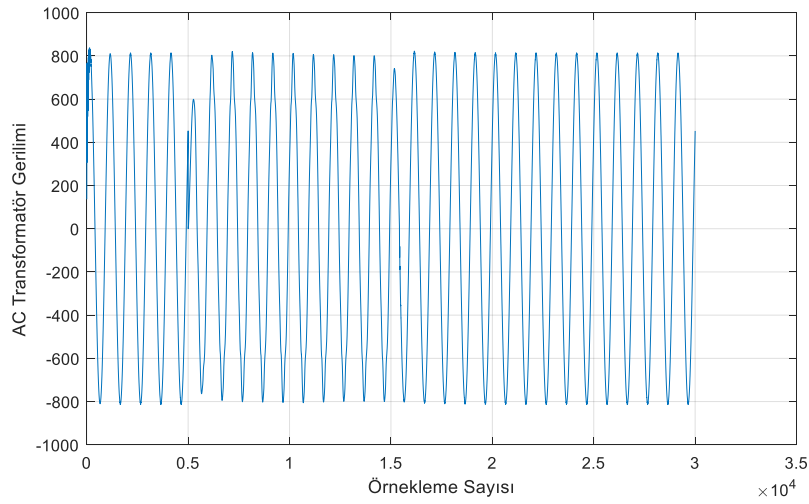
**Şekil 6.** AC Transformatör Çıkış Gerilimi (Statkomsuz)

Bu durumda transformatör çıkış gerilimindeki azalma iki kutup için de 100 V civarında olmaktadır. Bu durum hata süresince devam etmektedir. Şekilde görüldüğü üzere hata durumunda gerilim düzensizliği durumu ortaya çıkmıştır. Şekil 7 ile şekil 8'de statkomlu durumlara ait gerilimlerin değişimi verilmiştir.



**Şekil 7.** Cer Merkezi DC Besleme Gerilimi (Statkomlu)

Statkom kullanıldığı zaman ise şekilde görüldüğü üzere cer merkezinin boşa gerilimi 810 V civarında nominal değerinde seyir etmektedir. Bu durumda hatanın meydana getirdiği gerilim düşüşünün ortadan kaldırıldığı görülmektedir.



**Şekil 8.** AC Transformator Çıkış Gerilimi (Statkomlu)

Şekilde görüldüğü üzere statkom kullanıldığı durumda herhangi bir gerilim düzensizliği yaşanmamış olup gerilim nominal tepe değeri olan 800 V değerini almıştır. Statkom ile hata durumunda yaşanan gerilim düzensizliği problemi ortadan kaldırılmıştır. Tablo 2’de statkomlu ve statkomsuz durumlara ait gerilim bilgileri özet tablo ile verilmektedir.

**Tablo 2.** Statkomlu ve Statkomsuz Durumlara Ait Özet Durum

Ölçüm Noktaları (Hata Esnasında )	Statkomun Bağlı Olmadığı Durumda Gerilimler	Statkomun Bağlı Olduğu Durumda Gerilimler
Cer Merkezi DC Gerilimi	750 V DC	810 V DC
AC Transformator Tepe Gerilimi	700 V AC	800 V AC

Statkom kullanıldığı durumda gerçekleşen iyileşme bu tabloda net bir şekilde görülmektedir. İşletme sürekliliği ve performansı için cer merkezinde boşa gerilimin nominal değerinde olması gerekmektedir. EN 50163’e göre 750 V DC beslemeli bir raylı sistem hattı için sürekli gerilim aralığı 500 V ile 900 V arasında değişmekte olup nominal gerilim 750 V olarak kabul edilmektedir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada 750 V DC beslemeli bir demiryolu cer merkezinin güç kalitesi probleminin UVDGM Dstatkom ile çözülmesi araştırılmıştır. Tüm Sistem benzetim yoluyla modellenerek bu durum anlatılmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında trafo merkezinde oluşabilecek arıza durumunun benzetimi yapılarak gerilim düzensizliği problemi Dstatkom ile ortadan kaldırılmıştır. Benzetim çalışmalarıyla ilgili olarak cer merkezi çıkış gerilimlerine ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanarak iyileştirme durumu ortaya konulmuştur. Statkom kullanılmadığı durumda cer merkezi DC besleme gerilimi 750 V DC olurken sisteme statkom bağlandığında bu değer nominal değerine ulaşarak 810 V DC değerini almaktadır. AC bölümde de benzer durum görülmekte olup sisteme statkom bağlanmadığı durumda transformator tepe gerilimi 700 V AC değerini almaktadır. Statkom bağlandığında ise bu değer 800 V AC değerini almaktadır. Statkomlu durumda hatadan kaynaklanan gerilim düzensizliğinin engellendiği görülmektedir.

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı ekipmanların ve tüm sistemlerin performansı için çok kritiktir. Tek fazlı ve çok fazlı elektrik sistemlerindeki hata durumu ve gerilim düzensizliğine neden oluşturacak farklı durumlar güç kalitesini olumsuz etkilemektedir. Demiryollarında işletme sürekliliği esas olduğu için gerilim kararlılığı hayati bir konuma sahiptir. Bu nedenle cer beslemesinin sağlandığı besleme merkezlerinde böyle bir durumun yaşanması durumunda alınması gereken tedbirler özenle çalışılarak sisteme uygun çözümlerin sağlanması gerekmektedir.

#### Referanslar

Ananth, D., V., Kumar, Y., N., Tilak, B., B., G., Raghunath, P., S. (2012). Multi-level Inverters and its Application of Statcom Using Svpwm and Spwm Techniques. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2012, 5, 30-38.

- Anish, P., S., Ramarajan, T., Srinivas, T., A., Sasikumar, M. (2012). Voltage Balancing in SVM Controlled Diode Clamped Multilevel Inverter for Adjustable drives. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 1, 2231-2307.
- Balamurugan, C., R., Natarajan, S., P., Bensraj, R., Shanthi, B. (2016). A Review on Modulation Strategies of Multi Level Inverter. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 3, 681-705.
- Chang, W., N., Yeh, K., D. (2009). Design And Implementation of Dstatcom For Fast Load Compensation of Unbalanced Loads. *Journal of Marine Science and Technology*, 4, 257-263.
- Chen, R. (2016). DC Capacitor Minimization of Single Phase Power Conversion And Applications. Phd, Michigan State University, Michigan, USA.
- Deniz, E., Coteli, R., Tuncer, S., Dandıl, B., Gencoglu, M., T. (2011). Uzay Vektör PWM Anahtarlama Üç-Seviyeli H-Köprü İverter Tabanlı D-STATKOM. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May, Elazig, Turkey.
- Ertay, M., M., Dijle, M., Yücedağ, İ. (2016). Dinamik kompanzasyon cihazlarında kullanılan evirici yapıları: STATCOM ve DSTATCOM topolojileri. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2, 265-279.
- Galvan, J., I., L. (2006). Multilevel Converters: Topologies, Modelling, Space Vector Modulation Techniques and Optimisations. Phd, University of Seville, Seville, Spain.
- Giridharan, K., Chitra, A., Chellamuthu, C. (2011). Development of diode clamped inverter based STATCOM using SVPWM technique. *Giridharan et al./ Elixir Elec. Eng.*, 38, 4343-4347.
- Iswariya, T., Vennila, V. (2015). Design and Implementation of a Statcom for Railway Applications. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 10, 137-142.
- Jadeja, R., Patel, S., Chauhan, S., K. (2016). STATCOM – A Preface to Power Quality in Power Systems Performance. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 1, 895-905
- Khan, M., A. (2015). Comprehensive Analysis of Discontinuous Space Vector PWM Techniques for a Five-Phase Voltage Source Inverter. *International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering (IJRSEEE)*, 2, 1-17.
- Murali, C., H., Chandar, Y., B., Mothiram, B., Suresh, E. (2017). D-Statcom Using Space Vector Pulse Width Modulation Technique. *Journal of Advanced Research in Dynamical & Control Systems*, 11, 471-479.
- Saygın, A., Kerem, A. (2017). 6-Anahtarlı 3-Seviyeli Eviricide Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniğinin Uygulaması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 565-581.
- Salem, M., Hamouda, M., Slama, J., B., H. (2017). Comparative Study of Conventional Modulation Schemes in Terms of Conducted And Radiated EMI Generated by Three-Phase Inverters. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25, 1599-1611.
- Venkatesh, T., Narendra, Y. (2017). Modeling & Designing of A Novel Multilevel STATCOM With SVPWM Fed VSC For The Dynamic Stability Improvement Of A Grid- Connected Offshore wind Farm. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5, 7795-7804.