

# GERİLİM DENGESİZLİĞİNİN ÖLÇÜLMESİ İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM

<sup>1</sup>Merve ŞEN

<sup>1</sup>merve.sen@amasya.edu.tr

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Amasya Üniversitesi

<sup>2</sup>M. Erhan BALCI

<sup>2</sup>mbalci@balikesir.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Balıkesir Üniversitesi

## ÖZET

Gerilim dengesizliği miktarının ölçülmesi için NEMA standart MG1’de hat gerilim dengesizlik oranı (LVUR), IEEE standart 112’de faz gerilim dengesizlik oranı (PVUR), IEC standart 60034-26’da gerilim dengesizlik faktörü (VUF) ile literatürde kompleks dengesizlik faktörü (CVUF) gibi gerilim dengesizlik indisleri tanımlanmıştır. Bu indislerin teklik özelliklerinin olmayışının bir başka ifadeyle aynı indis değeri için çeşitli dengesiz gerilimlerin karşılık gelmesinin; bilhassa dengesiz gerilimler altında asenkron motorların deratasyon (azami yüklenme) eğrilerinin belirlenmesinde önemli bir problem olduğu literatürde birçok çalışmada işaret edilmiştir. Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen teklik problemini çözmek amacıyla gerilim dengesizliğinin ölçülmesinde IEEE standart 1459’da tanımlı eşdeğer gerilim etkin değeri ( $V_e$ ) ve CVUF indisi birlikte dikkate alınmıştır. Önerilen bu yaklaşım ve diğer indisler teklik bakımından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları önerilen yaklaşımın teklik özelliğinin olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Gerilim dengesizliği, dengesizlik indisleri, asenkron motor deratasyonu.

## 1. Giriş

Gerilim dengesizliği faz gerilimlerinin etkin değerlerinin birbirine eşit olmaması ve/veya faz gerilimlerinin açıları arasında 120° şer derece faz farkı olmaması sonucu meydana gelen bir güç kalitesi sorunudur [1]. Gerilim dengesizliğinin ana sebebi eşit güçlerde olmayan tek fazlı yüklerin beslenmesidir. Bununla birlikte havai hatların transpoze edilmemesi, güç sistem arızaları, gerilim regülatörlerinin düzgün çalışmaması gibi durumlar gerilim dengesizliğinin oluşmasında diğer sebeplerdir [1], [2].

NEMA standart MG1 [3] ve IEC standart 60034-26 [4]’de gerilim dengesizliğinin miktarını ölçmek amacıyla iki farklı indis tanımlanmıştır.

NEMA standardına göre gerilim dengesizlik indisi (line voltage unbalance rate (LVUR): hat gerilimi dengesizlik oranı); hat gerilimlerinin ortalaması referans gerilim seviyesi olarak kabul edilerek, hat gerilimlerinin bu referans değere göre bağlı sapma miktarlarının azami değeri biçiminde ifade edilmiştir. Ayrıca aynı standartta;

- Asenkron motorların %5 ve üzerinde LVUR değerlerine sahip gerilimler altında çalıştırılmaması gerektiği belirtilmiştir,

- %1-5 arası LVUR değerlerine sahip dengesiz besleme gerilimlerinde asenkron motorların aşırı ısınmasını önlemek için anma güç değerlerinin altında çıkış güçlerinde yüklenmeleri (deratasyon yapılmaları) gerektiği vurgulanmış, buna göre dengesiz gerilimler altında asenkron motorun azami yüklenme miktarı (derating factor (DF)) LVUR cinsinden ifade edilmiştir.
- Son olarak; %1’den küçük LVUR değerleri için asenkron motorun deratasyonunun gerekmediği belirtilmiştir.

IEC standardının tanımladığı gerilim dengesizlik indisi (voltage unbalance factor (VUF): gerilim dengesizlik faktörü) ise üç faz gerilimlerinin; negatif-sıra bileşeni genliğinin, pozitif sıra bileşeni genliğine oranı biçiminde ifade edilmiştir. Bu standart asenkron motorların çalıştırılmaması gereken VUF seviyesini % 2 ve üzeri olarak belirlemiştir.

Diğer taraftan IEEE standart 112 [5] NEMA standardının gerilim dengesizlik indisi tanımını kabul etmiş fakat faz-faz arası (hat) gerilimleri yerine faz gerilimlerini tanımın hesabında dikkate almıştır.

Türkiye’de Enerji Piyasası Denetleme Kurulu (EPDK) tarafından 12.09.2006 tarihinde yayımlanan Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliğin 22. Maddesine göre “ölçüm periyodu boyunca (ölçüm periyodu standartta 1 hafta olarak tanımlanmaktadır) ölçülen gerilim negatif bileşeni etkin değerlerinin 10’ar dakikalık ortalamalarının en az %95’inin pozitif bileşenlere oranı en fazla % 2 olmalıdır [6]. Tek fazlı veya iki fazlı yüklerin beslendiği noktalarda bu oran % 3’e kadar çıkabilir.” şeklinde gerilim dengesizliğinin ölçümü ve sınırlandırılması açıklanmıştır.

Bu standartlara paralel olarak literatürde yapılan çalışmalardan bazıları asenkron motorlarda farklı değerlerde kayıplara veya aşırı ısınmalara sebep olan çeşitli dengesiz gerilimler için; yukarıda bahsedilen gerilim dengesizlik indislerinin aynı değerde olduğunu göstermiştir [7], [8]. Bu olgu NEMA, IEC ve IEEE standartlarında tanımlı indislerin gerilim dengesizliğine bağlı asenkron motor kayıplarındaki artışın tahmini dolayısıyla asenkron motorların dengesiz besleme gerilimlerinde deratasyonu (azami yüklenme miktarının ayarlanması) için tek başına bir gösterge olamayacağını işaret etmiştir. Böylece [9]’da üç faz gerilimlerinin; negatif-bileşen fazör değerinin pozitif-bileşen fazör değerine oranı bir gerilim dengesizlik

indisi (complex voltage unbalance factor (CVUF): kompleks gerilim dengesizlik faktörü) olarak tanımlanmıştır. Fakat daha sonra yayınlanan [10]'da düşük/aşırı gerilim seviyelerinde meydana gelen dengesizlik durumlarında aynı CVUF değerlerinin ölçüldüğünü göstermiştir. Bu eksikliği gidermek amacıyla; aynı çalışmada ortalama gerilim değeri ile CVUF indisi, [11]'de pozitif sıra gerilimi ile CVUF indisi, [12]'de ise ortalama gerilim değeri ve pozitif sıra gerilimi cinsinden hesap edilen bir katsayı ile CVUF indisi deratasyon eğrilerinin belirlenmesinde dikkate alınmıştır.

Buraya kadar sunulan çalışmalardan görüldüğü gibi özellikle asenkron motorların dengesiz gerilimler altında deratasyon çalışmalarında kullanılmak üzere, teklik özelliğine sahip gerilim dengesizlik indis tanım arayışları hala devam etmektedir.

Bu bildiriye yukarıda bahsedilen çalışmalara katkı sağlamak amacıyla gerilim dengesizliğini ölçmek için IEEE standart 1459-2010 [13]'da tanımlı eşdeğer gerilim etkin değeri ( $V_e$ ) ve CVUF indisi birlikte dikkate alınmıştır. Önerilen bu yaklaşım ve diğer indisler teklik bakımından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları önerilen yaklaşımın teklik özelliğinin olduğunu göstermiştir.

## 2. Gerilim Dengesizlik İndisleri

Daha önce de belirtildiği gibi gerilim dengesizliğinin ölçümü için farklı uluslararası kuruluşlara ait üç değişik indis tanımı vardır. Bunlar; NEMA standardında tanımlı LVUR, IEEE standardında tanımlı PVUR ve IEC standardında tanımlı VUF indisleridir. Bu üç gerilim dengesizlik indisinin yanında literatürde yaygın olarak CVUF indisi dikkate alınmıştır. Bahsedilen dört farklı gerilim dengesizlik indisinin ifadeleri bu bölümde verilecektir.

### 2.1. NEMA Standardı Tanımı

NEMA standardı tarafından tanımlanmış olan ve literatürde hat gerilim dengesizlik oranı (LVUR) ismiyle de bilinen gerilim dengesizlik indisinin ifadesi (1)'de verilmiştir. Bu ifadeye göre LVUR indisi; hat gerilimleri etkin değerlerinin ortalama hat gerilimi değerinden azami sapma miktarı olarak izah edilebilir [14].

$$LVUR(\%) = \frac{Maks[|V_{ab} - V_{ort}|, |V_{bc} - V_{ort}|, |V_{ca} - V_{ort}|]}{V_{ort}} \cdot 100 \quad (1)$$

Denklem (1)'de yer alan  $V_{ort}$  terimi;

$$V_{ort} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (2)$$

ifadesinden hesaplanır.

### 2.2. IEEE Standardı Tanımı

NEMA ile IEEE standartlarının gerilim dengesizlik indisi tanımları aynı ifadelerle sahip olup aralarındaki fark NEMA'nın indis hesabında hat gerilimlerini, IEEE'nin ise faz gerilimlerini dikkate almasıdır [14].

Buna göre IEEE standardında yer alan ve literatürde faz gerilim dengesizlik oranı (PVUR) olarak da bilinen indisin ifadesi (3)'de verilmiştir:

$$PVUR(\%) = \frac{Azami[|V_a - V_{ort}|, |V_b - V_{ort}|, |V_c - V_{ort}|]}{V_{ort}} \cdot 100 \quad (3)$$

Denklem (3)'de yer alan  $V_{ort}$  terimi;

$$V_{ort} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (4)$$

Diğer taraftan hat gerilimleri sıfır sıra bileşeni içermez fakat faz gerilimleri sıfır sıra bileşeni içerirler. Gerilimin sıfır sıra bileşeni ise asenkron motor gibi nötür bağlantısı olmayan üç fazlı yüklerin performansına etki etmez. Bu sebeple gerilim dengesizliğinin asenkron motorların performansına etkisinin analizinde, faz gerilimleri dikkate alınarak hesaplanan PVUR'un uygun bir gösterge olmadığı açıktır.

### 2.3. IEC Standardı Tanımı

IEC standardı gerilim dengesizliği indisi tanımını yaparken simetrik bileşenleri kullanmıştır. Böylece literatürde gerilim dengesizlik indisi (VUF) olarak da bilinen IEC standardına ait gerilim dengesizlik indisi; gerilimin negatif sıra bileşeni genliğinin ( $V_-$ ) pozitif sıra bileşeni genliğine ( $V_+$ ) oranı biçiminde ifade edilmiştir:

$$VUF(\%) = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (5)$$

### 2.4. Kompleks Gerilim Dengesizlik Faktörü

[9]'da pozitif ve negatif sıra gerilimlerinin genlikleri ( $V_+$  ve  $V_-$ ) yanında açılarının ( $\theta_{v+}$  ve  $\theta_{v-}$ ) da asenkron motorların dengesizlik altında azami yüklenme miktarına etki ettiği görülmüştür. Bunun neticesinde aynı çalışmada kompleks gerilim dengesizlik faktörü (CVUF) tanımlanmıştır:

$$CVUF(\%) = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \angle(\theta_{v-} - \theta_{v+}) = VUF(\%) \angle\theta_v \quad (6)$$

## 3. Önerilen Yaklaşım

Önerilen gerilim dengesizliği ölçme yaklaşımında, IEEE std. 1459-2010'da tanımlı olan eşdeğer gerilim etkin değeri ( $V_e$ ) dikkate alınmıştır:

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} = \sqrt{V_+^2 + V_-^2} \quad (7)$$

Denklem (7)'de verilen  $V_e$  ifadesi  $V_+$  ve  $VUF(\%)$  indisi cinsinden;

$$V_e = V_+ \sqrt{1 + \left(\frac{VUF(\%)}{100}\right)^2} \quad (8)$$

biçiminde yazılabilir.

Bu ifadeden aynı  $V_e$  ve VUF değerleri için tek bir  $V_+$  ve  $V_-$  çifti olabileceği açıkça görülmektedir. Buradan yola çıkılarak  $V_e$  ile CVUF birlikte dikkate alındığı takdirde; farklı gerilim seviyelerinde rastlanabilecek aynı CVUF değerlerinin, dolayısıyla farklı gerilim seviyelerindeki dengesiz gerilim durumlarının ayırt edilebileceği sonucuna varılmıştır.

#### 4. Analiz

Bir gerilim dengesizlik indisinin tekliği “her bir farklı gerilim dengesizlik durumu için indisin farklı bir değer alması” manasına gelmektedir. Teklik özelliğine sahip bir dengesizlik indisi; asenkron motorlarda farklı değerlerde kayıplara veya aşırı ısınmalara sebep olan çeşitli dengesiz gerilimler için farklı değerler alacağından, gerilim dengesizliğine bağlı asenkron motor kayıplarındaki artışın tahmini dolayısıyla asenkron motorların dengesiz besleme gerilimlerinde deratasyonu için güvenilir bir gösterge olacaktır.

Bu bölümde LVUR, VUF ve CVUF indisleri ile önerilen yaklaşımın çeşitli dengesiz gerilim şartları için teklikleri diğer bir deyişle dengesizlik durumunu belirleme yetenekleri karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir. Bölüm 2’de belirtildiği gibi PVUR indisinin asenkron motorların dengesiz gerilimler altında performans analizi için uygun olmaması sebebiyle bu indis teklik analizinde dikkate alınmamıştır.

Analiz gerçekleştirilirken (8)’e göre;  $VUF=\% 5$  için  $V_e$  değeri 0.9 pu ile 1.1 pu arasında değiştirilerek dengesiz gerilimlerin pozitif ve negatif sıra bileşenleri türetilmiştir. Ayrıca dengesiz gerilimler türetilirken pozitif sıra geriliminin açısı  $0^\circ$ ’de sabit tutulmuş, negatif sıra geriliminin açısı ise  $0^\circ$  ile  $360^\circ$  arasında değiştirilmiştir. Son olarak türetilen dengesiz gerilimler hat gerilimleri olduğu için sıfır sıra bileşenleri yoktur.

Bu esaslara göre türetilen hat gerilimlerinin değişimi Şekil 1 (a)’da verilmiştir. Bu şekilden  $VUF=\% 5$  için çok sayıda dengesiz gerilim durumunun olduğu diğer bir ifadeyle VUF’un teklik özelliğine sahip olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi farklı gerilim seviyelerinde ve farklı simetrik bileşen açıları için aynı VUF değerini sağlayan birçok dengesiz gerilim durumunun olmasıdır.

Diğer taraftan türetilen dengesiz gerilim durumlarından CVUF(%)’un  $5\angle-130^\circ$  ve LVUR’un  $\% 5$  olduğu durumlar tespit edilerek, bunlarda hat gerilimlerinin değişimi sırasıyla Şekil 1 (b) ve (c)’de verilmiştir. Bu şekillerden CVUF ve LVUR indislerinin de VUF indisi gibi teklik özelliğine sahip olmadıkları görülmektedir. Bununla birlikte CVUF’un diğer iki indise göre gerilim dengesizlik durumlarını belirlemede daha başarılı olduğu açıktır. Ayrıca Şekil 1 (b) aynı CVUF’un gözlemlendiği dengesizlik durumları arasında gerilim seviyesi ( $V_e$ ) farkı olduğunu işaret etmektedir.

Son olarak; türetilen test gerilimleri önerilen yaklaşıma göre  $V_e=0.9$  pu ve  $CVUF= 5\angle-130^\circ$  için tarandığında Şekil 1 (d)’de verilen grafik elde edilir. Bu şekilden

$V_e=0.9$  pu ve  $CVUF(\%)= 5\angle-130^\circ$  için tek bir gerilim dengesizlik durumu olduğu dolayısıyla önerilen yaklaşımın teklik özelliğine sahip olduğu görülmektedir.

#### 5. Sonuç

Bu çalışmada gerilim dengesizlik miktarının ölçülmesinde karşılaşılan teklik problemini ortadan kaldırmak amacıyla IEEE standart 1459’da tanımlı eşdeğer gerilim etkin değeri ( $V_e$ ) ve CVUF indisi dengesizlik ölçümünde birlikte dikkate alınmıştır.

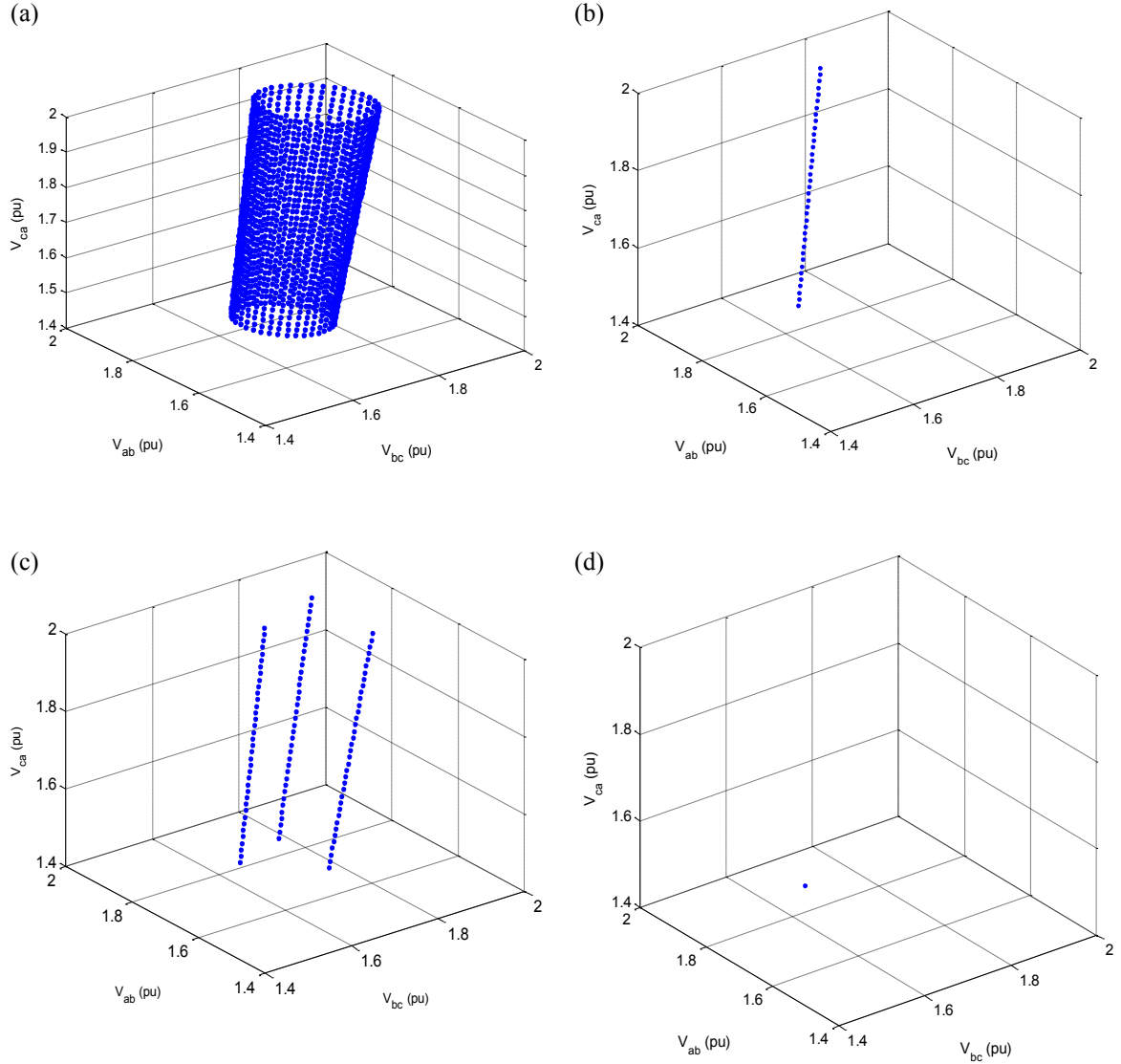
Yapılan niteliksel ve niceliksel analizlerden;

- VUF, CVUF, PVUR ve LVUR indislerinin teklik özelliğine sahip olmaması sebebiyle bu indislerin asenkron motorların dengesiz gerilimler altında deratasyon eğrilerinin belirlenmesinde tek başına kullanılmasının doğru olmayacağı,
- Önerilen yaklaşımın ise teklik özelliğine sahip olması sebebiyle asenkron motorların dengesiz gerilimler altında deratasyon eğrilerinin belirlenmesinde kullanıma uygun olduğu,

görülmüştür.

#### 6. Kaynakça

- [1] E. F. Fuchs, M. A. S. Masoum, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Elsevier Academic Press, 2008.
- [2] C. A. Reineri, J. C. Gómez, E. B. Balaguer and M. Morcos, “Experimental study of induction motor performance with unbalanced supply,” Electric Power Components and Systems, Volume 34, No. 7, pp. 817-829, December 2006.
- [3] Motor and Generators, Part 14.36: Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Polyphase Induction Motors, NEMA Standard MG1-1998 (Revision 3, 2002), 2002.
- [4] IEC Standard 60034-26, Rotating Electrical Machines, Part 26: Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Three-Phase Induction Motors, 2002.
- [5] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112, 1991.
- [6] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, <http://www.epdk.gov.tr> Erişim Tarihi: 15.02.2011.
- [7] Ching-Yin Lee, “Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three phase induction motor,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 14, no. 2, pp. 202–208, Jun. 1999.
- [8] Ching-Yin Lee, Bin-Kwie Chen, Wei-Jen Lee, Yen-Feng Hsu, “Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition”, Electric Power Systems Research, vol. 47, no. 3, pp. 153-163, Nov. 1998.



Şekil 1: (a)  $VUF=5\%$  için hat gerilimlerinin değişimi, (b)  $CVUF(\%)=5\angle-130^\circ$  için hat gerilimlerinin değişimi, (c)  $LVUR=5\%$  için hat gerilimlerinin değişimi ve (d)  $V_e=0.9$  pu ve  $CVUF(\%)=5\angle-130^\circ$  için hat gerilimlerinin değişimi.

- [9] Y. J. Wang, "Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 16, no. 3, pp. 270–275, Sep. 2001.
- [10] J. Faiz, H. Ebrahimpour, "Precise derating of three phase induction motors with unbalanced voltages", Energy Conversion and Management, vol. 48, no. 9, p.p. 2579-2586, Sept. 2007.
- [11] P. Gnacinski, "Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over or undervoltages", IEEE Trans Energy Convers, vol. 23, no. 2, pp. 363–371, 2008.
- [12] M. Anwari, A. Hiendro, "New Unbalance Factor for Estimating Performance of a Three-Phase Induction Motor With Under- and Overvoltage Unbalance", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 25, no. 3, pp. 619-625, Sept. 2010.
- [13] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std. 1459 – 2010.
- [14] P. Pillary, M. Manyage, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng. Rev., vol. 21, no. 5, pp.50 -51 2001.