

ENDÜKSİYON MOTORLARININDAKİ STATOR ARIZALARININ TESPİTİ

Müslüm Arkan¹ Hakan Çalış²

¹Elektrik ve Elektronik Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi
İnönü Üniversitesi, 44069 Malatya

²Teknik Eğitim Fakültesi

Süleyman Demirel Üniversitesi, 32260 Isparta

¹e-posta: markan@inonu.edu.tr ²e-posta: hcalis@tef.sdu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Arıza tespiti, simetrik bileşenler

ABSTRACT

This paper presents a non-invasive and on-line method for detection of stator winding faults in 3-phase induction motors from observation of negative sequence supply current. Negative sequence currents arising from supply unbalance are calculated using the reactive component of motor negative sequence impedance, which is essentially independent of temperature and speed variation. The effects of variation in load, supply voltage, and supply voltage unbalance, have been eliminated by using semi-empirical formulas based on theoretical and experimental results. Compensation for this negative sequence current before making the fault decision enables a high fault sensitivity to be achieved in the presence of normal variations in load, voltage, and unbalance.

1-GİRİŞ

Bugünkü birçok kritik endüstrideki gereksinimlerden biri güvenilirlik elektrikli motorlara ihtiyaç duyulmasıdır. Elektrikli motorların beklenmeyen arızaları başında yüksek onarım ücretleri, çalışanlar açısından güvenlik ve sağlık problemleri ve en önemlisi üretim kaybı meydana getirmektedir. Bugün gelinen yüksek teknolojik seviye ve üretim kolaylığından dolayı firmalar için önemli olan arızalardan dolayı üretim aksamalarını önlemektir. Bakım ve yenileme genelde ikinci planda kalmaktadır. Bundan dolayı büyük firmalar elektrikli makinalarının arıza tespiti için yüklü paralar harcamaktadırlar. Elektrikli makinalarının normal olmayan şartlar altında çalışma prensipleri ve elektrikli makinalarındaki arızalar yıllardan beri araştırmacıların ilgi alanı olmuştur. Elektrikli makinalarındaki arızalar elektrikli arızaları ve mekanik arızaları olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Elektrikli arızaları içinde %36 ile stator arızaları büyük önem taşımaktadır.

Fortescue [4] tarafından geliştirilen simetrik bileşenler teorisi endüksiyon motorların arıza ve normal olmayan şartlar altındaki çalışmaları analiz etmek için kullanılabilir. Simetrik

bileşenler teorisi kullanılarak 3 fazlı sistemin 3 dengesiz fazlı pozitif ardışık bileşenleri, negatif ardışık bileşenleri ve sıfır ardışık bileşenleri olmak üzere 3 dengeli sistem fazları cinsinden yeniden çözülebilir ve böylece asimetrik sistemin incelenmesini kolaylaştırır. Kohler ve arkadaşları [2] negatif ardışık empedansı kullanarak endüksiyon motorlarındaki stator sargılarının arızalarını tespit etmeye çalıştılar. Kliman ve arkadaşları [3] ise motorda bulunan ve motorun lineer olmayan ve üretim hatalarından dolayı kaynaklanan asimetrik yapıyı göz önüne alarak negatif ardışık akımından arıza tespiti etmeye çalıştılar. Bu çalışmada motorun manyetik özelliğinden kaynaklanan lineer olmayan ve üretim olanakları ve hatalarından dolayı asimetrik özelliklerin kompozisyonu genişletilmiştir. Statordaki sargı arızalarının tespiti simetrik kaynak ve sabit negatif ardışık empedans gerekliliğinden bağımsız hale getirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada simetrik bileşenleri gerçek zamanda elde edebilen yeni bir teknik kullanılmıştır.

2-STATOR ARIZASI BULMA ALGORİTMASI

Dengesiz 3 fazlı bir sistemin iki boyutlu koordinatlardaki güçlerinin kullanılmasıyla pozitif ve negatif ardışık bileşenlerinin bulunması metodu Huang [1] tarafından geliştirilmiştir. Fortescue'nun klasik simetrik bileşenler teoremi 3 fazlı dengesiz sistemi, sistemin fazlarını kullanarak dengeli pozitif negatif ve sıfır ardışık bileşenlere çevirir. Güçlerin Ayrıştırılması Tekniği (GAT) (Power Decomposition Technique-PDT) ise bu işlemi gerçek zaman sinyali kullanarak yapar. Böylece GAT metodu sistemin zaman fazlarının bulunması için kullanılan pozitif ve negatif ardışık bileşenlerinin gerçek zamanda bulunmasını değişik ve direkt bir yol sağlar.

GAT Metodu ile Negatif Ardışık Akımın Ölçülmesi:

Negatif ardışık bileşenlerin GAT metodu ile ölçülmesi için sistem akımları i_a, i_b ve i_c ve sistem voltajları v_a, v_b ve v_c ölçülmelidir. Ayrıca dengeli pozitif ardışık sinüzoidal

referans voltajları u_a , u_b ve u_c sinyalleri üretilir. GAT metodu ile negatif ardışık bileşenlerin bulunması için önce 3 faz akımı 2 faz akımına aşağıdaki denklemle transfer edilebilir

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

burada α ve β 2 eksenli ortogonal koordinatları gösterir. Referans voltajları da aynı yöntemle 2 fazlı sisteme dönüştürülebilir.

$$\begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Referans voltajları u_a ve u_β 2-boyutlu

$$u_a(t) = U \cos(\omega t) \text{ ve } u_\beta(t) = U \sin(\omega t) \quad (3)$$

şeklinde tanımlanabilir. U burada referans voltajın maksimum değeridir ve hesaplarda kolaylık sağlaması açısından $U=1$ olarak alınabilir.

Anlık reel ve ve imajineri güçler $p(t)$ ve $q(t)$

$$\begin{bmatrix} p_a(t) \\ p_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a(t) & 0 \\ 0 & u_\beta(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ve

$$\begin{bmatrix} q_a(t) \\ q_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u_\beta(t) & 0 \\ 0 & u_a(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

kullanılarak hesaplanabilir.

Bu güçlerin ortalama değerleri kaynağın tam bir veya birden fazla periyodu üzerinden entegral alınarak bulunur.

$$\begin{aligned} \overline{p_a(t)} &= P_a = \frac{1}{T} \int_0^T p_a(t) dt \\ \overline{p_\beta(t)} &= P_\beta = \frac{1}{T} \int_0^T p_\beta(t) dt \\ \overline{q_a(t)} &= Q_a = \frac{1}{T} \int_0^T q_a(t) dt \\ \overline{q_\beta(t)} &= Q_\beta = \frac{1}{T} \int_0^T q_\beta(t) dt \end{aligned} \quad (6)$$

burada T kaynağın periyodu; P ve Q ise aktif ve reaktif güç olarak adlandırılmıştır.

P_a , P_β , Q_a , Q_β güçler, pozitif ardışık voltajlar ve akımlarla alakalı olan pozitif ardışık güçler ve negatif ardışık voltajlar ve akımlarla alakalı negatif ardışık güçler şeklinde ayrılabilirler. Denklemlerde kullanılan 'p' pozitif ardışık bileşenleri, 'n' ise negatif ardışık bileşenleri göstermektedir 2 fazlı sistemde pozitif ardışık güçler

$$P_{ap}^i = P_a + P_\beta = P_{\beta p}^i \quad (7)$$

$$Q_{ap}^i = Q_a + Q_\beta = Q_{\beta p}^i$$

ve negatif ardışık güçler ise

$$P_{an}^i = P_a - P_\beta = -P_{\beta n}^i \quad (8)$$

$$Q_{an}^i = Q_a - Q_\beta = -Q_{\beta n}^i$$

şeklinde tanımlanabilir. Pozitif ardışık akımları i_{ap} ve $i_{\beta p}$

$$\begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_a^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} P_{ap}^i u_a - Q_{ap}^i u_\beta \\ P_{\beta p}^i u_\beta + Q_{\beta p}^i u_a \end{bmatrix} \quad (9)$$

ve negatif ardışık akımları i_{an} ve $i_{\beta n}$

$$\begin{bmatrix} i_{an} \\ i_{\beta n} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_a^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} P_{an}^i u_a - Q_{an}^i u_\beta \\ P_{\beta n}^i u_\beta + Q_{\beta n}^i u_a \end{bmatrix} \quad (11)$$

gerçek zamanda elde edilebilirler.

Akımın eş zamanlı olarak aynı işlemler voltaj içinde uygulanabilir. Kompleks formda $(x + jy)$, ardışık bileşenleri elde edilen bu sekiz değerden şöyle oluşturulabilirler

$$I_a = (P_{an}^i + jQ_{an}^i) = I_{ax} + jI_{ay} \quad (12)$$

$$I_\beta = (P_{\beta p}^i + jQ_{\beta p}^i) = I_{\beta x} + jI_{\beta y}$$

$$V_{an} = (P_{an}^v + jQ_{an}^v) = V_{anx} + jV_{any} \quad (13)$$

$$V_{\beta p} = (P_{\beta p}^v + jQ_{\beta p}^v) = V_{\beta px} + jV_{\beta py}$$

Eğer referans sinyalinin faz açısı pozitif ardışık voltaj ile aynı ise $V_{\beta py}$ değeri sıfırdır. Pozitif ardışık voltajın $V_{\beta p}$ faz açısı

ϕ_p

$$\phi_p = \alpha \tan \left(\frac{V_{\beta py}}{V_{\beta px}} \right) \quad (14)$$

ile bulunabilir. Daha sonra ardışık bileşenler $(\exp(-j\phi_p))$ çarpılarak $V_{\beta p}$ 'nin referans fazörü olarak kullanılması sağlanabilir. Bu bize diğer hesaplarda kolaylık sağlar.

3-STATÖR DURUMUN ANALİZİ

Yukarıda pozitif ardışık kaynak voltajı V_{sp} , pozitif ardışık akımı I_p , negatif ardışık kaynak voltajı V_{sn} ve negatif ardışık akımı I_n 'nin örneklenen voltaj ve akımlardan GAT metodu ile nasıl elde edileceği gösterildi. Simetrik bir sistemde voltaj ve akımların farklı simetrik bileşenleri bir birlerine bağlı değildir [6]. Yani simetrik sistemde, sıfır ardışık akımı sadece sıfır, pozitif ardışık akımı sadece pozitif ve negatif ardışık akımı sadece negatif gerilim düşümleri oluşturur. Böylece ardışık empedanslar ardışık voltajların ardışık akımlara bölünmesiyle bulunabilir. Motorun arızalı olmayan durumdaki negatif ardışık empedansı Z_{ln} negatif ardışık voltaj ve negatif ardışık akım kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$Z_{ln} = \frac{V_{sn}}{I_n} = \frac{V_{sn} + jV_{sy}}{I_{sn} + jI_{sy}} = R_{ln} + jX_{ln} \quad (15)$$

Statör arızası durumunda ölçme sonucu elde edilen negatif ardışık akım I_n iki bileşenden oluşmaktadır. Kaynaktan dolayı oluşan negatif ardışık akımı I_{sn} ve motordan (motordaki arızadan dolayı) kaynaklanan negatif akım I_{mn}

$$I_n = I_{sn} + I_{mn} \quad (16)$$

Böylece statör arızasından kaynaklanan negatif ardışık akım I_{mn}

$$I_{mn} = I_n - I_{sn} \quad (17)$$

Kaynaktan dolayı oluşan negatif ardışık akım I_{sn} daha önce tespit edilen motorun negatif ardışık empedansının Z_{ln} kullanılmasıyla elde edilebilir.

$$I_{sn} = \frac{V_{sn}}{Z_{ln}} \quad (18)$$

I_{mn} akımının değeri ve faz açısı statör sarımlarındaki arızanın durumunu belirtir.

Termal ve motorun lineer olmayan etkilerinin minimuma indirilmesi:

Motor, çalışma ortamı ve değişik yüklerden (ve yüksek yüklerden) dolayı ısınabilir ve bu da negatif ardışık empedansın rezistans kısmının değişmesine neden olur. Bu değişim eğer Z_{ln} 'e yansıtılmaz ise arıza akımı I_{mn} 'in değeri değişir (arıza olmadığı halde). Bu etkiyi en aza indirmek için I_{sn} akımı Z_{ln} 'nin sadece reaktans X_{ln} kısmı kullanılarak bulunabilir.

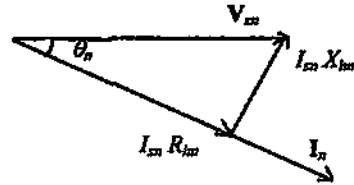
Şekil 1 arızalı olmayan motorun negatif ardışık voltaj V_{sn} ve bu voltajdan dolayı kaynaklanması beklenen negatif ardışık akımın I_{sn} fazörlerini göstermektedir. V_{sn} voltajı şekilden

$$V_{sn} = I_{sn} R_{ln} + jI_{sn} X_{ln} \quad (19)$$

ile hesaplanabilir. Arızalı olmayan motorun kaynaktan dolayı oluşan negatif ardışık akım ise

$$I_{sn} = \frac{V_{sn} \sin \theta_n}{X_{ln}} \quad (20)$$

bulunabilir. Burada $\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{X_{ln}}{R_{ln}} \right)$



Şekil 1: Negatif bileşenlerin fazör diyagramı

Deneylerde negatif ardışık kaynak voltajı elde etmek için her faz için bir variak kullanılmıştır. Böylece faz voltajlarının ayrı ayrı değiştirilebilmesi imkanı elde edilmiştir. Statör sarımlarına uygulanan maksimum voltaj negatif ardışık voltajın faz açısı ϕ_n ile orantılıdır. Yapılan deneyler sonucu negatif ardışık reaktansın daha önce sanıldığı gibi sabit olmadığı, negatif ardışık voltajın değerine ve faz açısına bağlı olduğu gösterilmiştir [5]. Aynı zamanda değişik yüklerde X_{ln} de değişik değerler alır (rotor oyuklarından dolayı) [5]. Negatif ardışık reaktansı X_{ln} aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{X_{ln}} = \gamma_0 + \gamma_1 V_{sn} + \gamma_2 \sin(2\phi_n) + \gamma_3 \cos(2\phi_n) \quad (21)$$

γ parametreleri ardışık en küçük kareler yöntemi ile deneyler olarak elde edilebilirler. Arızalı olmayan motor için negatif akım I_{sn} gözlenerek negatif ardışık kaynak voltajı V_{sn} ve ϕ_n açısı ϕ_n değiştirilir.

Motordaki yük değişimleri manyetik alanın değişmesine sebep olur. Bu motorun oluklarında manyetik doyuma sebep olur. Ayrıca motor da üretimden dolayı kaynaklanan belirli bir dengesizlik vardır ve bu yük ve voltaj değişmelerine bağlı olarak değişik değerlerde negatif akım oluşmasına sebep olur [5]. Bunu önlemek için motorun kaynak voltajı ve yük değişmelerine bağlı olan üçüncü bir negatif ardışık akım I_{mty} tanımlanabilir. Bu akımdaki değişim pozitif ardışık akımın yük bileşeni I_{px} ve manyetik bileşeni I_{py} akımı cinsinden yazılabilir.

$$I_{nniv} = \beta_0 + \beta_1 I_{px} + \beta_2 I_{px}^2 + \beta_3 I_{py} + \beta_4 I_{py}^2 \quad (22)$$

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$, ve β_4 parametreleri sabittir ve ardışık en küçük kareler yöntemi ile bulunabilirler. Bu parametreleri bulmak için kaynak voltajı dengelenir, voltaj ve yük değiştirilirken ölçülen negatif akım I_{nniv} ile sıfırlanması sağlanmaya çalışılır.

Böylece arıza akımı son olarak

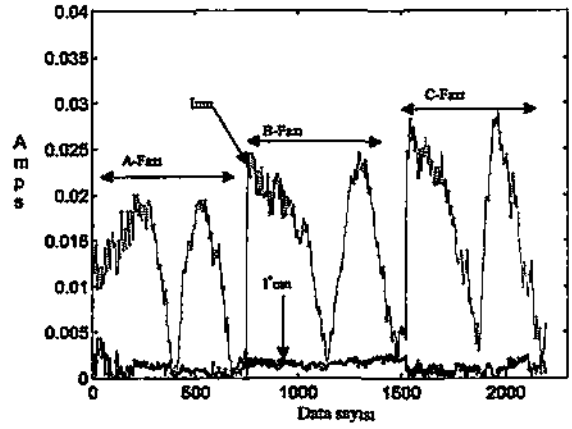
$$I_{nn}^* = I_n - I_{nn} - I_{nniv} \quad (23)$$

denklemleri elde edilebilir. Burada I_n toplam ölçülen negatif akım, I_{nn} kaynaktan dolayı oluşan negatif akım ve I_{nniv} ise yük ve voltajdan dolayı oluşan negatif akımdır.

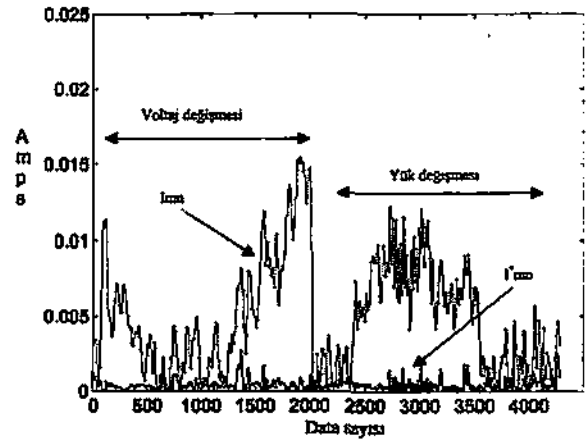
4. DENEYSEL SONUÇLAR

Geliştirilen stator sarımlarındaki arıza tespiti algoritması PC ve plug-in-card kullanılarak 2 HP lık bir Reliance motoru üzerinde test edilmiştir. Bu motor deney amaçlı olarak küçük sayıdaki sarım sayısının kısa devre edilebilmesi için özel olarak sarılmıştır. Tablo 1 motorun özelliklerini göstermektedir. Motorun stator sarımlarına bağlı 10 adet terminal (tap) vardır. 5 tanesi a- fazının 5 tanesi de b- fazının sarımlarına bağlıdır. Bu terminaler sayesinde her iki faz için 1, 2, 3 ve 4 adet sarım sayısı kısa devre edilebilir. Bu terminaler bir anahtar kutusuna bağlanmıştır. Böylece kısa devre edilen sarım sayısı ve faz anahtar yardımıyla değiştirilebilir. Kısa devre edilen sarımlara ayrıca değişebilen bir direnç bağlanmıştır. Dirençin amacı kısa devre durumunda oluşan yüksek akımın sınırlandırılmasıdır. Böylece sarımların tamamen kısa devre olması önlenmiştir.

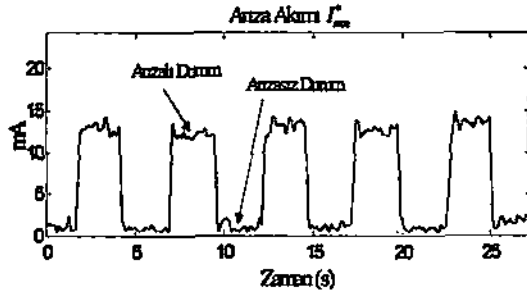
Aşağıdaki şekiller test edilen motor için elde edilen sonuçları göstermektedir. Şekil 2 ve 3 kompanzasyonun önemini belirlemek için verilmiştir. Burada arıza akımı kompanzasyondan önce (17) ve sonra (23) ki değerleri için aynı şekil üzerinde verilmişlerdir. Şekil 2 negatif kaynak voltajın değişik değerlerde her 3 faza da uygulanması ile elde edilmiştir. Şekil 3 ise pozitif kaynak voltajının ve yükün değiştirilmesiyle elde edilmiştir. Dikkat edilirse bu her iki deneyde arıza olmadığı halde kompanzasyondan önceki akım I_{nn} sanki hata varmış gibi değeri değişmektedir. Buna karşılık kompanzasyondan sonraki I_{nn}^* akımının değeri sıfıra yakın kalmaktadır ki buda beklenen değerdir. Şekil-4 iki sarımın belli aralıklarla (anahtar açıp kapatmak yoluyla) kısa devre edilmesi ile elde edilmiştir. Şekil-5 ise sırasıyla bir, iki, üç ve dört sarımın kısa devre edilmesiyle elde edilmiştir.



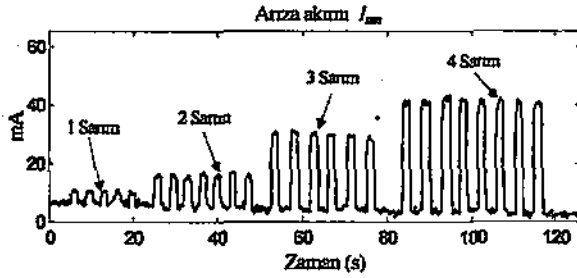
Şekil-2: Arıza akımı. Negatif voltaj değişik değerlerde değişik fazlara uygulanmıştır.



Şekil-3: Voltaj ve yük değişmesi için arıza akımı



Şekil 4: 2 sarımın kısmen motor yük altındayken kısa devre edilmesi.



Şekil-5: 1, 2, 3, ve 4 sarımın sırasıyla %1 dengesiz voltaj ve tam yük altında kısa devre edilmesi

5-SONUÇ

Bu çalışmanın sonucunda geliştirilen algoritma ile negatif akım kullanılarak stator arızalarının her türlü çalışma şartları altında yüksek bir hassasiyetle tespit edilebileceği gösterilmiştir. Bu hassasiyete yalnızca motorun artık negatif akımların dışınımla ulaşılamayacağı aynı zamanda negatif reaktansa (veya empedansa) oluşan değişikliklerinde göz önünde tutulması gerektiği gösterilmiştir. Teorik ve deneysel bulgular birlikte kullanılarak bunların nasıl kompanze edileceği gösterilmiştir.

Reliance Motor	
Hat Gerilimi	460 V
Tam yük hat akımı	2.7 A
Güç	2 HP
Çalışma hızı @ 60 Hz	1752 rpm
Kutup sayısı	4
Güç Faktörü	0.815
Statorun sarım sayısı	252
Rotorun bar sayısı	44
Servis faktörü	1.15

Tablo 1: Motorun özellikleri. Motor star bağlıdır.

REFERANSLAR

- [1] S.P. Huang, "Active Mains Supply Harmonic Filtering," *University of Sussex*, PhD Thesis 1997.
- [2] J.L. Kohler, J. Sottile, and F.C. Trutt, "Alternatives for Assessing the Electrical Integrity of Induction Motors," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol.28, No.5 pp.1109-1117, 1992.
- [3] G.B. Kliman, W.J. Premerlani, R.A. Koegl, and D. Hoeweler, "A New Approach to On-Line Turn Fault Detection in AC Motors," *IAS Annual Meeting*, pp.687-693, October 1996.
- [4] C.L. Fortescue, "Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Network," *AIIE Trans.* Vol.37, pp.1027-1140, 1918.
- [5] M. Arkan, "Stator Fault Diagnosis In Induction Motors," *University of Sussex, PhD Thesis*, 2000.
- [6] C.F. Wagner, and R.D. Evans, "Symmetrical Components," *McGraw-Hill Book Company, Inc.* New York, 1933.
- [7] S. Williamson, and K. Mirzorian, "Analysis of Cage Induction Motors With Stator Winding Faults", *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, N0.7, pp.1838-1842, July 1985.
- [8] T. Soderstrom, and P. Stoica, "System Identification," *Prentice Hall*, London, 1989.
- [9] G.J. Paoletti, and A. Rose, "Improving Existing Motor Protection for Medium Voltage Motors", *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol.25, No.3, pp.456-461 May/June 1989