



Sürekli mıknatıslı senkron motorun stator sargısı sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması

Timur LALE*

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır
timur.lale@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0002-6958-5057 Tel: (412) 241 10 00 (3633)

Bilal GÜMÜŞ

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır
bilgumus@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0003-4665-5339

Ferhat ÇIRA

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır
fcira@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0001-6729-1736

Geliş: 18.04.2018, Kabul Tarihi: 12.06.2018

Öz

Bu çalışmada, vektör kontrollü yüzeysel Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun (SMSM) stator sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla motorun sağlıklı ve arızalı benzetim modelleri Matlab/Simulink'te oluşturulmuştur. Benzetim modelinde SMSM'nin statorunun tek fazında, sarımlar arasında %2, %12.5, %25 oranında kısa devre olması durumu için zaman domeninde üç farklı arıza analizi yapılmıştır. Aynı motorun sağlıklı durumu için oluşturulan benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile üç farklı arızalı durumda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzetim modelinde, sarımlar arası kısa devre arızasının artmasına paralel olarak motorun moment değişimindeki salınımların arttığı görülmüştür. Aynı şekilde kısa devre arızalı motorun arızalı faz akımı kısa devre arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak artmıştır. Bu da SMSM'nin aynı yük altında şebekeden daha çok akım çekmesine neden olmaktadır. Benzetim modelindeki aynı koşullar deneysel çalışmada da gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile benzetim modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmadan ve benzetim modelinden elde edilen sonuçlardan stator sargısı sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansını düşürdüğü gözlenmiştir. Deneysel çalışmadan ve benzetim modelinden elde edilen sonuçlar makalede sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sürekli mıknatıslı senkron motor, stator kısa devre arızası, arıza akım analizi

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI:

Giriş

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) tam dinamik performans, yüksek verimlilik, yüksek güç yoğunluğu, yüksek hızda çalışma, kompakt tasarım gibi üstün özelliklere sahiptir. Ayrıca SMSM’de güç faktörü ve verimlilik asenkron motorlardaki gibi kutup sayısına bağlı değildir. Bu üstün özellikleri sayesinde SMSM silah sanayisi, robotik, otomotiv, havacılık ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Rajagopalan *vd.*, 2007; Ruiz *vd.*, 2009). Kritik öneme sahip uygulamalarda kullanılan bir motor türü olan SMSM’lerin çalışma ömürleri sağlıklı olarak çalışmasına bağlıdır. Motorlarda görülen arızaların önceden tespiti ve neden olduğu etkilerin analiz edilmesi oldukça önemlidir. Elektrik makinalarında stator sargısının yalıtımından kaynaklı kısa devre arızası sıklıkla görülen arıza türlerinden biridir. Özellikle hassas hız ve konum kontrolü gerektiren uygulamalarda sıkça kullanılan bir motor türü olan sürekli mıknatıslı senkron motorda, statorda meydana gelebilecek kısa devre olayı beklenmeyen sonuçlar doğurabileceğinden kısa devre arızasının motor performansı üzerindeki etkisinin analiz edilmesi oldukça kritik ve önemlidir (Cira, Arkan ve Gumus, 2016).

Sürekli mıknatıslı senkron motorda (SMSM) arızalar elektrik, manyetik, ve mekanik arızalar olarak sınıflandırılabilir. Sarımlar arası kısa devre arızası en önemli arıza türlerinden biridir (Awadallah ve Morcos, 2003). Sarımlar arası kısa devre arızası, bobin-bobin kısa devre arızası, faz-faz kısa devre arızası ve faz toprak kısa devre arızası gibi sargı arızaları SMSM’lerdeki elektrik arızaların kaynağıdır. Elektrik makinalarındaki arızaların yaklaşık %21’i kısa devre arızasından kaynaklı arızalardır (Faiz, Member ve Exiri, 2016). SMSM’deki stator sargısı kısa devre arızası motor performansını önemli derecede etkiler. Sarımlar arası kısa devre arızası stator sargısındaki yalıtımın bozulması sonucu oluşur. Sarımlar arası kısa devre arızası başlangıç aşamasında gerekli tedbirler alınmazsa, motora ciddi hasar verebilecek faz-toprak arızasına neden olabilir (Cira, Arkan ve Gumus, 2016). SMSM’nin stator sarımlar arası kısa devre arızası, statordaki arızalı faz sargısında aşırı bir

akımın oluşmasına neden olur (Cira, Arkan ve Gumus, 2017). Statorda oluşan bu aşırı akımlar, kalıcı mıknatısların nötr akısına zıt bir manyetik akı oluşmasına ve arızanın şiddetine bağlı olarak rotor mıknatıslarının demagnetize olmasına neden olabilmektedir (von Jouanne, 2002).

Sarımlar arası kısa devre arızası (kda) kısa devre olan sargının sarımlarında yüksek akımın akmasına neden olur, bu aşırı akım kısa devre olan bölgenin sıcaklığının artmasına neden olur ve yeterli önlemler zamanında alınmazsa tüm sargının kısa devre olmasına neden olabilmektedir (Kliman *vd.*, 1996). Kısa devre arızasının nedeni termal stres, elektriksel stres, mekaniksel stres ve çevresel stres olarak gösterilebilir. Örneğin, sıcaklıktaki artış, aşırı yüklenme, gerilim dengesizliği, rulman arızaları, shaft kayması, rotor stator arasındaki hatalı hizalama, kirlenme ve yüksek nem gibi faktörler sargı yalıtım arızasına yol açabilir ve sargı yalıtım arızası da sarımlar arası kısa devre arızasına (kda) neden olabilir (Grubic *vd.*, 2008).

Elektrik motorlardaki stator sargı arızalarıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Toliat ve Lip, 1995; El Hachemi Benbouzid, 2000; Ye Zhongming ve Wu Bin, 2000; Siddique, Yadava ve Singh, 2005; Cira *vd.*, 2016). (Thomson ve Gilmore, 2003)’te, asenkron motorlardaki arızaları tespit etmek için motor akım imza analizi (MAİA) kullanılmıştır. MAİA kısa devre sargı arızaları, kırılan rotor çubukları, eksen kaçıklığı ve diğer mekanik arızaları tespit etmek için etkin bir durum izleme yöntemidir (Thomson ve Gilmore, 2003). MAİA yönteminin üstün özellikleri, yüklenme ve diğer dengesiz durumlardan etkilenmemesi, elektriksel ve mekaniksel arızalardan kaynaklanan harmonik bileşenlerin daha görünür hale gelmesidir (Mehala ve Dahiya, 2007; Messaoudi ve Sbita, 2010). Akım, gerilim, aksel akı ve d-q bileşenlerinin analizi kullanılarak, kısa devre arızaların analiz ve tespiti için birkaç yöntem vardır. (Toliat ve Lip, 1995; Toliat, Waikar ve Lipo, 1998).

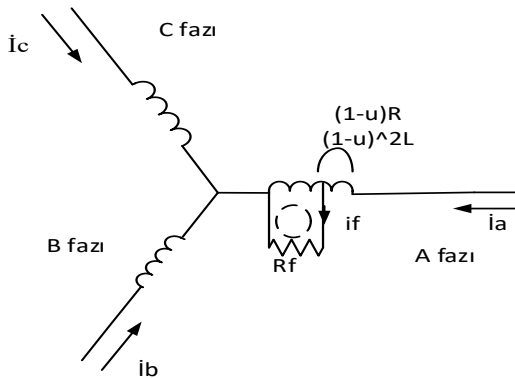
Bu çalışmada stator sargısı sarımlar arası kısa devre arızasının SMSM’nin performansı

üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu amaçla öncelikle SMSM'nin Matlab/Simulink'te sağlıklı ve arızalı benzetim modeli oluşturulmuştur. Motorun arızalı benzetim modelinde tek fazında, sarımlar arasında %2, %12.5, %25 oranında kısa devre olması durumu için, üç farklı arıza analizi yapılmıştır. SMSM'nin sağlıklı ve üç farklı arızalı durumu için motorun akım ve moment değişimleri incelenmiştir. Aynı şekilde benzetim modeline benzer koşullar, deneysel çalışma setinde de sağlanmıştır. Bu amaçla, motorun stator sargılarının faz sargısında sarımlar arasında %2, %12,5 ve %25 büyüklüğündeki üç farklı kısa devre oranına sahip, üç özdeş motor kullanılmıştır. Deneysel çalışmada motorların sağlıklı durumundan elde edilen sonuçlar ile arızalı durumlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. SMSM'nin sağlıklı ve üç farklı arızalı durumu için elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar makalede sunulmuştur.

Stator sarımlar arası kısa devre arızalı SMSM'nin matematiksel modeli

Sağlıklı SMSM'nin matematiksel modeli

Sağlıklı ve stator sargısı kısa devre arızası durumunda SMSM'nin dinamik davranışını analiz etmek için oluşturulan matematiksel modeller kullanılarak Matlab/Simulink'te SMSM'nin benzetim modeli geliştirilmiştir. Manyetik devre kayıplarının ve manyetik doymanın olmadığını varsayımıyla, sağlıklı bir SMSM'nin abc stator referans düzlemindeki toplu denklemi aşağıdaki gibi modellenebilir (Lai vd., 2014).



Şekil 1: Kısa Devre arızasının gösterimi

$$v_{s,abc} = R_s \cdot i_{s,abc} + \frac{d\lambda_{s,abc}}{dt} \quad (1)$$

Burada stator faz gerilim matrisi $v_{s,abc} = [v_a \ v_b \ v_c]^T$, stator direnç matrisi $R_s = \text{diag}\{R \ R \ R\}$, stator faz akımları $i_{s,abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$. Rotor kalıcı mıknatısları ve stator sargılarınca üretilen üç fazlı manyetik akı bağı denklemleri, $\lambda_{s,abc} = [\lambda_a \ \lambda_b \ \lambda_c]^T$ denklem (2)'de ifade edilmiştir.

$$\lambda_{s,abc} = L_s i_{s,abc} + \lambda_{PM,abc} \quad (2)$$

Burada $\lambda_{PM,abc}$, rotordaki kalıcı mıknatıslar tarafından üretilen akıyı ifade eder ve $\lambda_{PM,abc} = \lambda_{PM} [\cos\theta_a \ \cos\theta_b \ \cos\theta_c]^T$ eşitliği ile görüldüğü gibi rotor konumuna bağlı olarak değişir. λ_{PM} rotor mıknatısın akısı, θ_a A fazının konumunu gösterir ve $\lambda_{PM,abc}$ 'nin elektriksel hız ω_e ve zamanın fonksiyonu olduğu $\theta_a = \omega_e t$, $\theta_b = \omega_e t - \frac{2\pi}{3}$, $\theta_c = \omega_e t + \frac{2\pi}{3}$ açı eşitliklerinden görülebilmektedir. Endüktans matrisi denklem (3)'deki gibi yazılabilir.

$$L_s = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \quad (3)$$

Kontrolör tasarımını ve motor modelini basitleştirmek için park dönüşümü kullanılır (Lai vd., 2014). Park dönüşümü, aşağıdaki \mathbf{P} ile gösterilen dönüşüm matrisi ile abc referans düzlemindeki değişkenleri dq0 referans düzlemine dönüştürür. Benzetim modelinde SMSM'nin vektör kontrollü modeli kullanılmıştır.

$$\mathbf{P} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_a & \cos\theta_b & \cos\theta_c \\ -\sin\theta_a & -\sin\theta_b & -\sin\theta_c \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_a & -\sin\theta_a & 1 \\ \cos\theta_b & -\sin\theta_b & 1 \\ \cos\theta_c & -\sin\theta_c & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_{s,dq0} &= \mathbf{P} v_{s,abc} \\ &= \mathbf{R}_s i_{s,dq0} + \mathbf{P} \frac{d\lambda_{s,abc}}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\lambda_{s,dq0} = \mathbf{P}\lambda_{s,abc} = \mathbf{L}_{dq0}i_{s,dq0} + [\lambda_{PM} \ 0 \ 0]^T \quad (7)$$

Bu motorun modelini tamamlamak için elektromekanik kısma ait denklem (8)'teki gibi ifade edilir.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (8)$$

Denklemdaki J sistemin ataletini, T_L yük momentini, T_e elektromekanik momentini, B sistemin sürtünme katsayısını, ω_m rotorun dönme hızını gösterir.

Stator kısa devre arıza durumunda SMSM'nin matematiksel modeli

Stator kısa devre arızası meydana geldiğinde motor sargısındaki etkin sarım sayısı azalır. Bu durum, motorun armatür akımlarında asimetriye neden olur ve motor performansını düşürür. Stator sarımlar arası kısa devre arızası Şekil 1'de gösterildiği gibi genellikle R_f gibi ekstra dirençle modellenir. R_f kısa devre sarımlarda meydana gelen sargı yalıtım arızasını gösterir. Buna ek olarak R_f kısa devre arıza şiddetine bağlı olarak değişir, düşük değerli R_f değeri daha yüksek kısa devre arıza şiddetini gösterir (Urresty, Riba ve Romeral, 2012). A fazındaki toplam sarım sayısı N ve kısa devre sarım sayısı n olduğunu varsayalım, $u = \frac{n}{N}$ kısa devre sarım oranını gösterir. u aynı zamanda kısa devre arıza (kda) şiddetini göstermektedir. Arıza durumunda A fazındaki sargının etkin direnç ve endüktansı sırasıyla $R_{a-etkin} = (1-u)R$ ve $L_{a-etkin} = (1-u)^2L$ olur. Kısa devre olan sarımlardan i_f kısa devre arıza akımı geçtiğinden kısa devre olan sarımlar bir faz gibi işlev görür. Böylece motoru 4 faz şeklinde modellemek gerekir. Sonuç olarak arızalı durumundaki motorun modeli, abc stator referans düzleminde denklem (9)'daki gibi yazılabilir.

$$v_{sf,abc} = \mathbf{R}_{sf}i_{sf,abc} + \frac{d\lambda_{sf,abc}}{dt} \quad (9)$$

Burada $v_{sf,abc} = [v_a \ v_b \ v_c \ v_f]^T$ gerilim vektör matrisi, $i_{sf,abc} = [i_a \ i_b \ i_c \ i_f]^T$ akım vektör matrisidir, akı bağıntıları $\lambda_{sf,abc} =$

$[\lambda_a \ \lambda_b \ \lambda_c \ \lambda_f]^T$ denklem (11)'deki gibi ifade edilir, direnç matrisi denklem (10)'deki gibi olur.

$$\mathbf{R}_{sf} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & -uR \\ 0 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 \\ uR & 0 & 0 & -uR - R_f \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\lambda_{sf,abc} = \mathbf{L}_{sf}i_{sf,abc} + \lambda_{PMf,abc} \quad (11)$$

Rotordaki sürekli mıknatıslar tarafından üretilen akı $\lambda_{PMf,abc} = \lambda_{PM}[\cos\theta_a \ \cos\theta_b \ \cos\theta_c \ u\cos\theta_a]^T$ ile ifade edilir. Endüktans matrisi denklem (12)'daki gibi değişir.

$$\mathbf{L}_{sf} = \begin{bmatrix} L & M & M & -uL \\ M & L & M & -uM \\ M & M & L & -uM \\ uL & uM & uM & -u^2L \end{bmatrix} \quad (12)$$

Gerilim ve akı bağıntıları aşağıda gösterildiği gibi sağlıklı ve arızalı olmak üzere iki kısma ayrılır.

1) Sağlıklı kısım:

$$v_{s,abc} = \mathbf{R}_s i_{s,abc} + \frac{d\lambda_{s,abc}}{dt} - uR[i_f \ 0 \ 0]^T \quad (13)$$

$$\lambda_{s,abc} = \mathbf{L}_s i_{s,abc} + \lambda_{PM,abc} - u[L \ M \ M]^T i_f \quad (14)$$

2) Arızalı kısım:

$$0 = R_f i_f + uR(i_f - i_a) - \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (15)$$

$$\lambda_f = u[L \ M \ M]i_{s,abc} - u^2 L i_f + u\lambda_{PM} \cos\theta_a \quad (16)$$

(13) numaralı denkleme Park dönüşümü uygulanarak motor modelin sağlıklı kısmının $dq0$ referans düzlemindeki denklemleri (17) ve (18)'deki elde edilir.

$$v_{s,dq0} = \mathbf{P}v_{s,abc} = \mathbf{R}_s i_{s,dq0} + \mathbf{P} \frac{d\lambda_{s,abc}}{dt} - \frac{2}{3} u R i_f \left[\cos\theta_a - \sin\theta_a \frac{1}{2} \right]^T \quad (17)$$

$$\lambda_{s,dq0} = \mathbf{P}\lambda_{s,abc}$$

$$= L_{dq0} i_{s,dq0} + [\lambda_{PM} \ 0 \ 0]^T - \frac{2}{3} u i_f \left[L_d \cos\theta_a - L_q \sin\theta_a \frac{1}{2} L_{ls} \right]^T \quad (18)$$

Motorun sağlıklı kısmına ait gerilim vektörü $dq0$ referans düzleminde denklem (19)'teki gibi yazılabilir.

$$v_{s,dq0} = \begin{bmatrix} v_{d,abc} \\ v_{q,abc} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Motorun arızalı kısmına Park dönüşümünü uygulamadan önce denklem (15)'ki gerilim ve akı denklemleri aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$v_f = R_f i_f = uR(i_d \cos\theta_a - i_q \sin\theta_a - i_f) - u\omega_e(i_d L_d \sin\theta_a + i_q L_q \cos\theta_a) + u \left(L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \frac{di_q}{dt} \sin\theta_a \right) - u^2 L \frac{di_f}{dt} - u\omega_e \lambda_{PM} \cos\theta_a \quad (20)$$

$$\lambda_f = u L_{dq0} i_{s,dq0} - u^2 i_f + u \lambda_{PM} \cos\theta_a \quad (21)$$

Denklem (20)'e Park dönüşümü uygulanarak motorun arızalı kısmının dq eksenindeki gerilim bileşenleri denklem (22)'deki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_{d,f} \\ v_{q,f} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} v_f \begin{bmatrix} \cos\theta_a \\ -\sin\theta_a \end{bmatrix} \quad (22)$$

Denklem (19) ve denklem (22) birleştirilerek SMSM'nin rotor eksenli $dq0$ referans düzlemindeki gerilim bileşenleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{d,abc} \\ v_{q,abc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{d,f} \\ v_{q,f} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Arızalı faz sargısındaki sirkülasyon (arıza) akımı (i_f) denklem (24) uygulanarak bulunabilir.

$$v_f - R_f i_f = 0 \quad (24)$$

Sağlıklı durumda, SMSM tarafından üretilen elektromanyetik moment denklem (25) ile

hesaplanabilir. Aynı prensibe göre stator kısa devre arızası durumunda, üretilen elektromanyetik moment denklem (26) ile hesaplanabilir.

$$T_e = \frac{3}{4} N_p [i_q \lambda_{PM} + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (25)$$

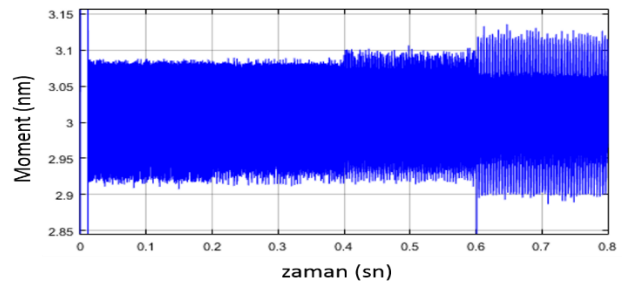
$$T_{ef} = \frac{3}{4} N_p [i_q \lambda_{PM} + (L_d - L_q) i_d i_q] + \frac{1}{2} N_p u i_f \lambda_{PM} \sin\theta_a \quad (26)$$

Benzetim Modelinin Sonuçları

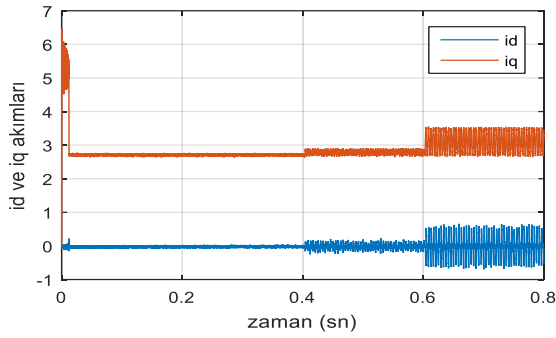
1800 rpm hızında, tam yüklü durumdaki SMSM'nin stator a faz sargısında sarımlar arası kısa devre arıza oranı %2, %12.5, ve %25 olma hali için benzetim yapılmıştır. Üç farklı arızalı durum ve sağlıklı durum için benzetim modelinden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Benzetimde kullanılan motorun parametreleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Benzetimde kullanılan SMSM'nin Parametreleri

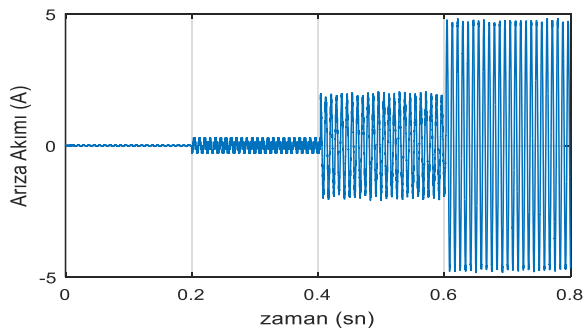
Güç	1 kW
Kutup Sayısı	8
PM akısı, λ	0.1852 Wb
Bobin İndüktansı, L	0.0116 H
Ortak İndüktans, M	0.00445 H
Ld=Lq	0.00715 H
Faz Direnci, R	7.6 Ω
Atalet momenti	0.0001854 kgm^2
Kısa Devre Oranı	u
Yük momenti, T_L	3 Nm
Rotor açısal hız	1800 dev/dk



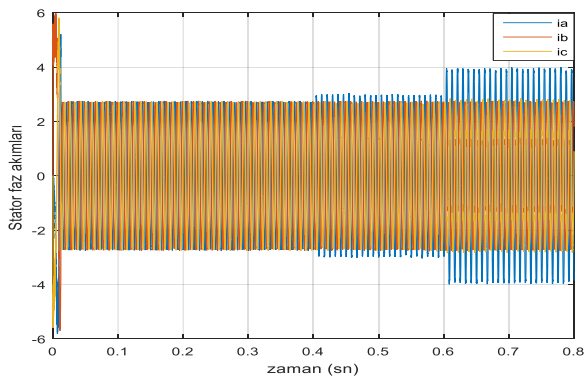
Şekil 2: SMSM'un Moment Değişimi ($0 < t < 0.2$ sağlıklı, $0.2 < t < 0.4$ %2 kda, $0.4 < t < 0.6$ %12.5 kda, $0.6 < t < 0.8$ %25 kda)



Şekil 3: SMSM'un i_d ve i_q Akımlarının Değişimi
($0 < t < 0.2$ sağlıklı, $0.2 < t < 0.4$ %2 kda, $0.4 < t < 0.6$
%12.5 kda, $0.6 < t < 0.8$ %25 kda)



Şekil 4: SMSM'un Arıza Akımının Değişimi
($0 < t < 0.2$ sağlıklı, $0.2 < t < 0.4$ %2 kda, $0.4 < t < 0.6$
%12.5 kda, $0.6 < t < 0.8$ %25 kda)



Şekil 5: Stator Faz Akımlarının Değişimi
($0 < t < 0.2$ sağlıklı, $0.2 < t < 0.4$ %2 kda, $0.4 < t < 0.6$
%12.5 kda, $0.6 < t < 0.8$ %25 kda)

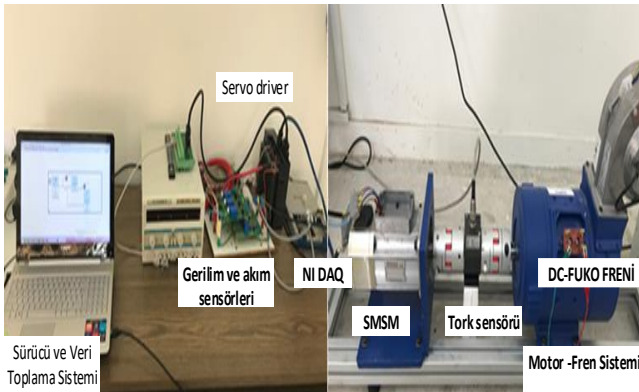
Şekil 2'de görüldüğü üzere, aynı motorun sağlıklı ve üç farklı arızalı durumu için moment değişimleri karşılaştırıldığında; sağlıklı durumda motorun moment salınımlarının tepeden tepeye genlik değeri 0.15 Nm'dir. Arıza şiddeti %2

olduğunda motor moment dalgalanmasında %2'lik bir artış olduğu, arıza şiddeti %12.5 olduğunda moment dalgalanmasında %13'lük bir artış olduğu, arıza şiddeti %25 olduğunda ise moment dalgalanmasında %65'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir. Moment değişimindeki salınımların artması motordaki titreşimlerin artmasına ve mekaniksel strese neden olmaktadır. Şekil 3'te SMSM'nin stator faz akımlarının rotor referans düzlemindeki i_d ve i_q akım bileşenlerinin sağlıklı ve üç farklı arızalı durumuna göre değişimi gösterilmektedir. i_q akımının sağlıklı hali ve üç farklı arızalı durum karşılaştırıldığında i_q akımının genlik değeri ve salınımlarının sarımlar arası kda şiddetine bağlı olarak arttığı şekil 3'te görülmektedir. i_q akımının genlik değerinin artması motorun aynı yük momentini döndürmek için şebekeden daha fazla akım çektiğini gösterir. Bu da SMSM'nin performans ve verimini düşürür. Şekil 4'te kısa devre (sirkülasyon) akımının arıza şiddetine bağlı olarak değişimi görülmektedir. Kda şiddeti %2 olduğunda kısa devre akımının genliği 0.3 A iken, kda şiddeti %12.5 olduğunda kısa devre akımının genliğinin 1.99 A'ye, kda şiddetinin %25 olduğunda ise kısa devre akımının genliğinin 4.83 A'ye yükseldiği şekil 4'te görülmektedir. Arıza akımının artması motor sargılarındaki sıcaklığın artmasına neden olur, bu da motorun stator sargılarındaki yalıtımın zamanla bozulmasına neden olur. Şekil 5'te SMSM'nin faz akımlarının sağlıklı ve üç farklı arızalı duruma göre değişimi gösterilmektedir. Sağlıklı durumundaki motorun faz akımları düzgün ve simetrik olduğu, %2 kda durumunda faz akımlarının simetrisini koruduğu ve a faz akımının genliği 2.74 A olduğu, %12.5 kda durumunda faz akımlarının simetrisinin bozulduğu ve a faz akımının genliğinin 3.05 A'ye yükseldiği, %25 kda durumunda ise simetrisinin daha da bozulduğu ve a faz akımının genliğinin 3.95 A'ye yükseldiği tespit edilmiştir.

Deneysel çalışma düzeneği ve sonuçlar

Deneysel çalışmada her fazında 280 sarım olan üç fazlı, 3-Nm, 1-kW anma değerlerinde ve sırasıyla %2, %12.5 ve %25'lik sarımlar arası

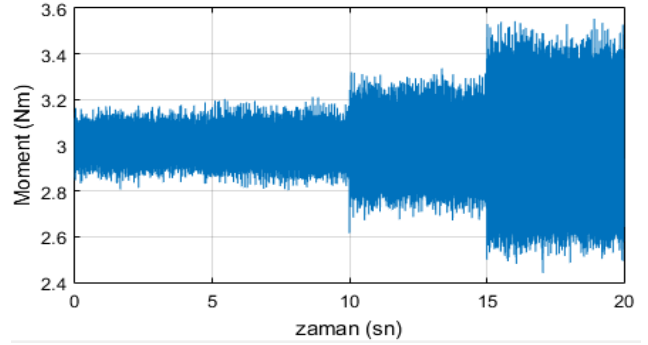
kda oranına sahip olan üç özdeş SMSM kullanılmıştır. Kullanılan motorlar, konfigürasyona bağlı olarak hem sağlıklı hem de arızalı sinyallerin elde edilebileceği şekilde tasarlanmıştır. Akım ölçümleri için LA 55-P model akım algılayıcıları kullanılmıştır. Motor milindeki moment ölçümü için de DRBK-20-n model moment sensörü kullanılmıştır. Motoru sürmek için modeli 8 SS N 008 001 olan FEMSAN servo motor sürücüsü kullanılmıştır. Motoru yüklemek amacıyla da fuko freni kullanılmıştır. Fuko frenin DC besleme gerilim değeri değiştirilerek test edilen motorun yükleme miktarı ayarlanmıştır. Gerçek zamanlı stator akım ve gerilim verileri, motor milindeki moment verisi 10 kHz örnekleme frekansında modeli NI 6341 DAQ olan veri toplama kartının analog portları kullanılarak alınmış ve veri toplama kartına uyumlu olan LABVIEW arayüz program aracılığıyla kaydedilmiştir. Deneysel sistemin görüntüsü şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6: Deneysel sistemin görüntüsü

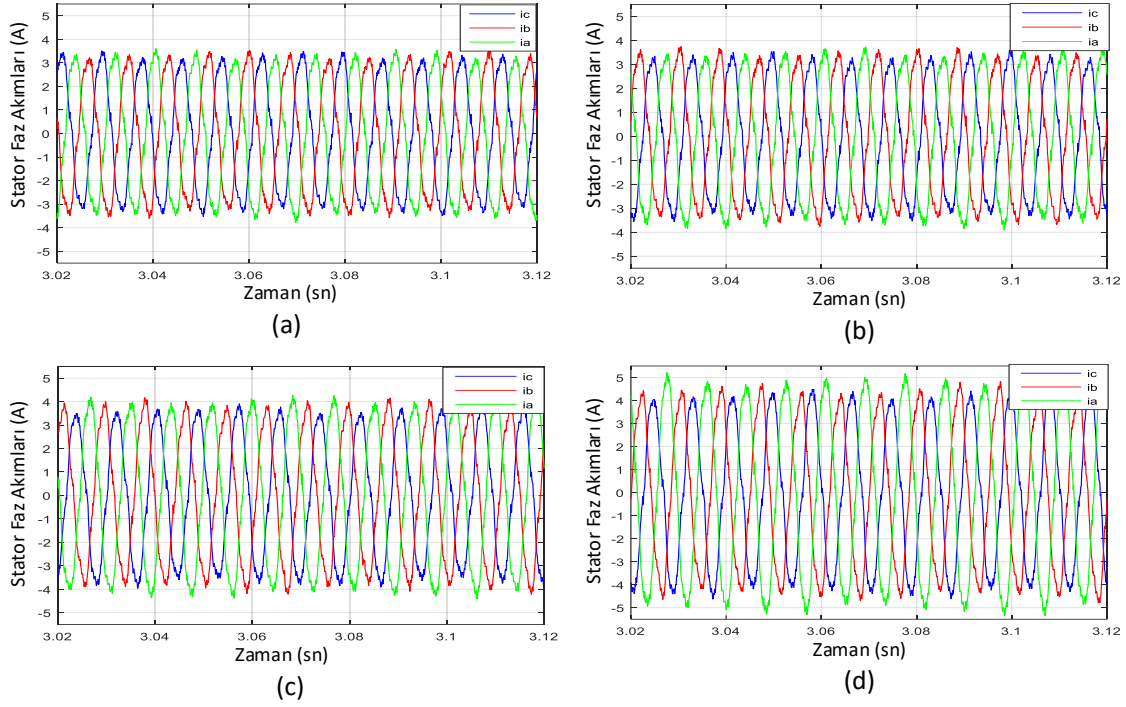
Deneysel Çalışmanın Sonuçları

1800 rpm hızında, tam yüklü durumdaki SMSM'nin stator a faz sargısında sarımlar arası kısa devre arıza oranının %2, %12.5, ve %25 olması ve sağlıklı durum için deneysel düzenekten elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.



Şekil 7: SMSM'un Moment Değişimi (0<t<5 sağlıklı, 5<t<10 %2 kda, 10<t<15 %12.5 kda, 15<t<20 %25 kda)

Şekil 7'de aynı motorun sağlıklı ve üç farklı arızalı durumdaki moment salınımları karşılaştırıldığında; sağlıklı durumda moment salınımlarının tepeden tepeye genlik değeri 0.37 Nm'dir, kda şiddeti %2 olduğunda moment salınımlarının %8 arttığı, kda şiddeti %12.5 olduğunda moment salınımlarının %94 arttığı, kda şiddeti %25 olduğunda ise moment salınımlarının %214 arttığı ölçülmüştür. Moment salınımlarının artmasıyla motordaki titreşim ve gürültünün arttığı gözlenmiştir. Bu da motorda mekanik strese neden olmaktadır. Şekil 8 sağlıklı ve üç farklı arızalı durumunda SMSM'nin stator faz akımların değişimlerini göstermektedir. Sağlıklı durumdaki motorun a faz sargısındaki akımın genliği 3.44 A iken, %2 kda durumunda motorun arızalı a faz sargısındaki akımın genliği 3.53 A'e, %12.5 kda durumunda motorun arızalı faz sargısındaki akımın genliği 4.12 A'e, %25 kda durumunda ise arızalı faz sargısındaki akımın genliği 5.20 A'e yükseldiği şekil 8'de görülmektedir. Aynı şekilde motorun b ve c faz sargısındaki akımlar da stator sargısı sarımlar arası kısa devre arızasının etkisiyle, kontrol sisteminin referans hızda çalışma yönündeki kontrolü nedeniyle artmıştır.



Şekil 8: SMSM'nin faz akımları a) sağlıklı, b) %2 kda, c) %12.5 kda, d) %25 kda

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, SMSM'nin stator sargısı sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla SMSM'nin sağlıklı ve sarımlar arası kısa devre arızalı benzetim modeli Matlab/Simulink'te oluşturulmuştur. Aynı motorun sağlıklı benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile üç farklı arızalı durumdaki benzetim modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzetim modelinden elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde; sağlıklı durumdaki moment salınımların tepeden tepeye genlik değeri 0.15 Nm'dir, %2 kısa devre arıza durumunda momentteki salınımların %2 arttığı, %12.5 kısa devre arızası durumunda moment salınımlarının %13 arttığı, %25 kısa devre arıza durumunda ise %65 arttığı gözlenmiştir. Moment sinyalindeki salınımların artması motordaki titreşimlerin artmasına ve mekanik strese neden olmaktadır. Aynı şekilde kısa devre arızasının meydana geldiği motor sargısındaki faz akımının kısa devre arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak ciddi bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Özellikle %25 kısa devre arızası durumunda arızalı faz

sargısındaki faz akımının sağlıklı durumdaki aynı faz sargısındaki faz akımının 1.44 katına çıktığı tespit edilmiştir. Motorun diğer iki sağlıklı faz sargısındaki faz akımlarının da sarımlar arası kısa devre arızasının etkisiyle arttığı görülmüştür.

Benzetim modelindeki aynı koşullar deneysel çalışmada da gerçekleştirilmiştir. Benzetim modeline benzer sonuçlar deneysel olarak da elde edilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde sağlıklı durumdaki motorun moment salınımların tepeden tepeye genlik değeri 0.37 Nm'dir, %2 kısa devre arıza durumunda moment salınımlarının %8 arttığı, %12.5 kısa devre arızası durumunda moment salınımlarının %94 arttığı, %25 kısa devre arızası durumunda ise moment salınımlarının %214 arttığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde stator faz akımlarının da kısa devre arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Özellikle %25 kısa devre arızası durumunda arızalı sargıdaki faz akımı sağlıklı durumdaki aynı sargıdaki faz akımının 1.51 katına kadar arttığı tespit edilmiştir.

Benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile deneysel düzenekten elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında şekilsel olarak örtüştüğü ama nümerik olarak tam uyuşmadığı görülmektedir. Nümerik olarak tam uyuşmaması benzetim modeli oluşturulurken manyetik devre kayıplarının ve manyetik doymanın olmadığı gibi varsayımlardan kaynaklanmıştır. Bunun yanında deneysel düzeneğe akım, gerilim, moment ölçümlerindeki hatalar ve parazitler de sonuçların farklılaşmasına neden olabilmektedir.

Kısa devre arızası durumunda motorun faz sargılarındaki simetrisinin bozulduğu, motorun aynı yük altında şebekeden daha fazla akım çektiği tespit edilmiştir. Bu durum motordan beklenen performansı ve verimi düşürmektedir. Motorda var olan stator sarımlar arası kısa devre arızasının etkilerinin bilinmesi, motorun arızalı olduğunun tespiti açısından kullanıcılar için önemli bir yol gösterici olacaktır. Bu nedenle bu etkilerin motor performansı üzerindeki tespiti oldukça önemlidir.

Kaynaklar

- Cira, F. *et al.* (2016) ‘Analysis of stator inter-turn short-circuit fault signatures for inverter-fed permanent magnet synchronous motors’, *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, pp. 1453–1457. doi: 10.1109/IECON.2016.7793717.
- Awadallah, M. A. and Morcos, M. M. (2003) ‘Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives - An overview’, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **18(2)**, pp. 245–251. doi: 10.1109/TEC.2003.811739.
- Cira, ferhat; Arkan, Muslum; Gumus, B. (2017) *Sürekli Miknatıslı Senkron Motorun Stator Kısa Devre Arızasının Tespiti ve Arıza Şiddetinin Otomatik Olarak Belirlenmesi*. inönü University.
- CIRA, F., ARKAN, M. and GUMUS, B. (2016) ‘Detection of Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors and Automatic Classification of Fault Severity via a Pattern Recognition System’, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, **11(2)**, pp. 416–424. doi: 10.5370/JEET.2016.11.2.416.
- Faiz, J., Member, S. and Exiri, A. H. (2016) ‘Simulation of permanent magnet synchronous motors under short circuit’, *Melecon 2016*, (April), pp. 18–20.
- Grubic, S. *et al.* (2008) ‘A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **55(12)**, pp. 4127–4136. doi: 10.1109/TIE.2008.2004665.
- El Hachemi Benbouzid, M. (2000) ‘A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **47(5)**, pp. 984–993. doi: 10.1109/41.873206.
- von Jouanne, a. (2002) ‘Closure on “assessment of voltage unbalance”’, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **17(4)**, pp. 1176–1177. doi: 10.1109/TPWRD.2002.805032.
- Kliman, G. B. *et al.* (1996) ‘A new approach to on-line turn fault detection in AC motors’, in *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*. IEEE, pp. 687–693. doi: 10.1109/IAS.1996.557113.
- Lai, C. *et al.* (2014) ‘Analysis of stator winding inter-turn short-circuit fault in interior and surface mounted permanent magnet traction machines’, *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pp. 1–6. doi: 10.1109/ITEC.2014.6861775.
- Mehala, N. and Dahiya, R. (2007) ‘Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction’, *International Journal*, **2(1)**, pp. 29–35.
- Messaoudi, M. and Sbita, L. (2010) ‘Multiple Faults Diagnosis in Induction Motor Using the MCSA Method’, *Image Processing*, **1(2003)**, pp. 190–195.
- Rajagopalan, S. *et al.* (2007) ‘Dynamic Eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet

- Detection in Trapezoidal Flux (Brushless DC) Motors Operating Under Different Load Conditions', *IEEE Transactions on Power Electronics*, **22(5)**, pp. 2061–2069. doi: 10.1109/TPEL.2007.904183.
- Ruiz, J.-R. R. *et al.* (2009) 'Detection of Demagnetization Faults in Permanent-Magnet Synchronous Motors Under Nonstationary Conditions', *IEEE Transactions on Magnetics*, **45(7)**, pp. 2961–2969. doi: 10.1109/TMAG.2009.2015942.
- Siddique, A., Yadava, G. S. and Singh, B. (2005) 'A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors', *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **20(1)**, pp. 106–114. doi: 10.1109/TEC.2004.837304.
- Thomson, W. and Gilmore, R. (2003) 'Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives-fundamentals, Data interpretation, and industrial case histories', *Proceedings of 32nd Turbo ...*, (1987), pp. 145–156. Available at: <http://turbo-lab.tamu.edu/proc/turboproc/T32/t32-16.pdf>.
- Toliyat, H. A. and Lip, T. A. (1995) 'of Cage', **10(2)**, pp. 241–247.
- Toliyat, H. A., Waikar, S. P. and Lipo, T. A. (1998) 'Analysis and simulation of five-phase synchronous reluctance machines including third harmonic of airgap MMF', *IEEE Transactions on Industry Applications*, **34(2)**, pp. 332–339. doi: 10.1109/28.663476.
- Urresty, J. C., Riba, J. R. and Romeral, L. (2012) 'Application of the zero-sequence voltage component to detect stator winding inter-turn faults in PMSMs', *Electric Power Systems Research*. Elsevier B.V., **89**, pp. 38–44. doi: 10.1016/j.epr.2012.02.012.
- Ye Zhongming and Wu Bin (2000) 'A review on induction motor online fault diagnosis', in *Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435)*. Int. Acad. Publishers, pp. 1353–1358. doi:10.1109/IPEMC.2000.883050.

Investigation of the effects of stator winding inter turn short circuit fault on permanent magnet synchronous motor's performance

Extended abstract

In recent years, permanent magnet synchronous motors (PMSM) have been widely used especially in electric vehicle applications, industrial and other fields. The operating life of motors used in such critical application depend on running as healthy. It is very important that knowledge of the impact of faults in motors and early detection of faults. Short circuit faults that originated from stator winding insulation failure are one of the most frequent fault types in electrical machines. Analysis the effect of stator short circuit fault on motor performance is critical and important because it may cause unexpected results, especially in permanent magnet synchronous motor, commonly used in application where precise speed and position control is required.

In this paper, it has been investigated that the effects of stator winding inter-turn short circuit fault on vector controlled surface-mounted permanent magnet synchronous motor's performance. For this purpose, faulty and healthy simulation model of motor in Matlab/Simulink software was created. The short-circuit failure severity of 2%, 12.5% and 25% in the single phase of the stator of the PMSM were generated via a simulation model that could be adjusted with respect to fault severity. The results obtained from the simulated model for the healthy condition of the same motor were compared with the results obtained in the case of the faulty. When the results from the simulation model were analyzed; in the healthy state the amplitude value of moment oscillations peak to peak is 0.15 Nm, in case of %2 short circuit fault the torque fluctuations have increased by 2%, in case of 12.5% short circuit fault the torque fluctuations have increased by 13%, when 25% short circuit fault the torque fluctuations have increased by 65%. The increase in torque oscillations leads to increased noise and vibrations in the motors. The phase current of the PMSM was monitored in time domain. As inter turn the short circuit fault severity increases, faulty phase current, circulating current of faulty phase and other two healthy phase currents of motor increase due to the fault severity

increase. Especially, in case of 25% short-circuit failure, it was determined that the phase current in the faulty phase winding increases 1.44 times the phase current in the same phase winding in the healthy state.

The same conditions as in the simulated model were also carried out in the experimental study. Similar results in the simulation model were obtained experimentally. When the results obtained from the experimental study are analyzed; in the healthy state the amplitude value of moment oscillations peak to peak is 0.37 Nm, when the short circuit fault intensity is 2% the oscillations in the torque signal have increased by 2%, when the short circuit fault intensity is 12.5% the oscillations in the torque signal have increased by 94%, as the short circuit fault intensity is 25% the oscillations in the torque signal have increased by 214%. In the same way, stator phase currents have been observed to increase due to the increase in short circuit fault intensity. In the case of a short circuit failure of 25%, phase current in the short circuit faulty winding has been determined to increase up to 1.51 times the phase current in the same winding in a healthy state.

The results obtained from the simulation model and the results obtained from the experimental setup show that they correspond to each other in shapely but are not fully congruent with numerically. Numerical incompatibility is caused by assumptions such as magnetic circuit losses and magnetic saturation when the simulation model is constructed.

In case of short circuit failure, it has been determined that motor's symmetry in phase windings is unbalanced, motor draws more current from the network under the same load. This situation reduces motor performance and efficiency.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, stator short circuit fault, fault current analysis.