

# Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Minimum Kayıp Kontrolü

## Minimum Loss Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

Hüseyin Erdoğan<sup>1</sup>, Bilal Gümüş<sup>1</sup>, Mehmet Özdemir<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Dicle Üniversitesi

erdogan@dicle.edu.tr, bilgumus@dicle.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Fırat Üniversitesi

mozdemir@firat.edu.tr

### Özet

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), sahip oldukları yüksek verim, hızlı dinamik tepki, yüksek güç yoğunluğu ve lineer moment kontrol yeteneği gibi özellikleri nedeniyle, yüksek performanslı endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Günümüzde sürekli mıknatıslı senkron motorların özellikle hibrid elektrikli araçlarda kullanımı yaygındır. Elektrikli araçlarda yüksek verimin oldukça önemli olması nedeniyle, SMSM'lerde minimum kayıp kontrolü ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada, SMSM'ye uygulanan minimum kayıp kontrol tekniklerinin motorun harcayacağı enerji üzerindeki azaltıcı etkilerinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda öncelikle SMSM kayıp modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, alan zayıflatma ve amper başına maksimum moment kontrol teknikleri kullanılarak elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

### Abstract

Permanent magnet synchronous motors (PMSM), are often used in high performance industrial applications due to their high efficiency, fast dynamic response, high power density and ability to control linear torque features. Today, permanent magnet synchronous motors are widely used especially in hybrid electric vehicles. As a result of the importance of high efficiency in electric vehicles the minimum loss control needs of PMSM's has emerged.

In this study, it has intended to show minimum loss control techniques' effects on energy reduction of PMSM. In this context, at first PMSM loss model has created. In this model, the field weakening and maximum torque per ampere control techniques were used, and the obtained results analyzed.

### 1. Giriş

Elektrikli araç uygulamalarında genellikle motorun geniş bir hız aralığında çalışması gerekmektedir. Ayrıca aracın bataryasının uçlarındaki gerilimin genliği de farklı yükler altında değişim göstermeye meyillidir. Düşük gerilim aralığında, rotor hızının yeterli olmamasına rağmen, istenilen

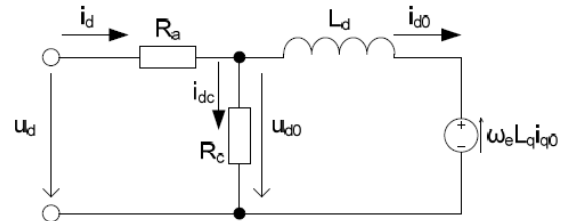
işletme hızını elde etmek için kontrol modunun alan zayıflatma bölgesine girmesi için zorlama gereksinimi ortaya çıkar. Bu nedenle alan zayıflatmalı kontrol elektrikli araçlar için çok önemlidir.

SMSM'deki kayıplarının minimum düzeye indirgenmesini amaçlayan bu çalışmada öncelikle elektriksel kayıpların ihmal edilmediği SMSM kayıp modeli oluşturulmuştur. Akabinde birbirinden farklı çalışma şartlarına uygun olan, alan zayıflatma ve amper başına maksimum moment kontrol teknikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Son olarak maksimum verimi elde edebilmek için bu tekniklerin birlikte kullanıldığı benzetim modeli oluşturulmuş ve sonuçlar irdelenmiştir.

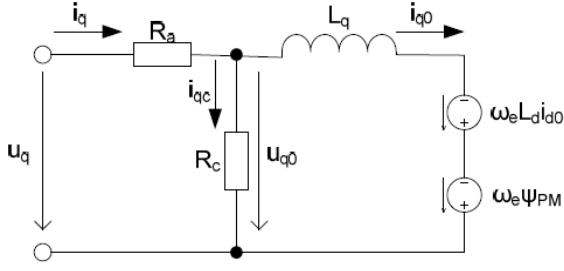
#### 1.1. SMSM Kayıp Modeli

SMSM'lerde minimum kayıp kontrolü benzetimi yapabilmek için öncelikle kayıpların ihmal edilmediği SMSM kayıp modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada uygulanan kontrol yöntemlerine uygun olması açısından SMSM'nin d-q referans modeli baz alınmış ve çalışmalar bu model üzerine oturtulmuştur.

Kayıpların ihmal edilmediği bir SMSM'nin eşdeğer d ve q eksenli eşdeğer devreleri Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Kayıpların ihmal edilmediği bir SMSM'nin d- eksenli eşdeğer devresi



Şekil 2: Kayıpların ihmal edilmediği bir SMSM'nin q- eksen eşdeğer devresi

Şekil 1 ve Şekil 2'deki devrelerdeki  $R_a$  faz direncini,  $R_c$  demir çekirdek direncini,  $i_d$  ve  $i_q$  sırasıyla d ve q eksen akımlarını,  $i_{d0}$  ve  $i_{q0}$  sırasıyla demir çekirdek direncine paralel olan koldan geçen d ve q eksen akımlarını,  $i_{dc}$  ve  $i_{qc}$  sırasıyla demir çekirdek direnci üzerinden geçen akımları,  $u_d$  ve  $u_q$  sırasıyla d ve q eksen gerilimlerini,  $L_d$  ve  $L_q$  sırasıyla d ve q eksen endüktanslarını,  $\omega_e$  rotorun acısal hızını ve  $\Psi_{PM}$  sürekli mıknatısların akı yoğunluğunu temsil etmektedir. Böylece eşdeğer devrelerden SMSM'nin kayıpların da dahil edildiği dinamik eşitlikler Denklem 1 ve Denklem 2'deki gibi elde edilir.

$$\frac{di_{d0}}{dt} = \frac{1}{L_d} \left( R_c \frac{u_d + R_c i_{d0}}{R_a + R_c} - R_c i_{d0} + \omega_e L_q i_{q0} \right) \quad (1)$$

$$\frac{di_{q0}}{dt} = \frac{1}{L_q} \left( R_c \frac{u_q + R_c i_{q0}}{R_a + R_c} - R_c i_{q0} + \omega_e (\Psi_{PM} + L_d i_{d0}) \right) \quad (2)$$

Bu denklemlerde ihmal edilmeyen  $R_c$ 'nin akımlar üzerindeki etkisi açıkça görülebilmektedir. Böylece kayıpların da dahil edildiği bir SMSM'nin dq eşdeğer devresine uyarlanmış mekanik ifade Denklem 3'teki gibi elde edilmiş olur.

$$T_e = \frac{3}{2} p_p \left[ \Psi_{PM} i_{q0} + (L_d - L_q) i_{d0} i_{q0} \right] \quad (3)$$

Burada  $p_p$  kutup çifti sayısını temsil etmektedir.

## 2. SMSM Minimum Kayıp Kontrolü

SMSM sürücülerde yüksek performans elde etmek için, motorun nominal hızın altında çalıştığı durumlarda, minimum genlikte akım elde edebilmek için d-ekseni akımı genellikle sıfır değerinde tutulur. Ama  $i_d=0$  kontrol metoduyla motorun DC bara geriliminin sınırlı olmasından dolayı nominal hızın üzerinde çalıştırılmaz. Bu nedenle yüksek hızlı uygulamalarda  $i_d < 0$  olmasını sağlayan alan zayıflatma yöntemi kullanılır. Vektör kontrollü motor sürücülerinde işletme limitleri genellikle motor ve inverter değerlerinin göz önünde bulundurulduğu d ve q eksen akımlarının sınırları ve d ve q eksen gerilimleri sınırları ile ifade edilir. Bu sınırlar aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_{sm}^2 \quad (4)$$

$$u_d^2 + u_q^2 \leq U_{sm}^2 \quad (5)$$

Burada  $U_{sm}$  ve  $I_{sm}$  sırasıyla inverterin maksimum faz geriliminin ve maksimum hat akımının genliğini temsil etmektedir. Ayrıca gerilim sınır elipsiyle sarımsı olan gerilim limit bölgesi de aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\left( R_a i_d - \omega_e L_q i_{q0} \right)^2 + \left( R_a i_q + \omega_e (L_d i_{d0} + \Psi_{PM}) \right)^2 = U_{sm}^2 \quad (6)$$

(6) denkleminde  $i_{d0} = i_{q0} = 0$  alınarak kritik açılal frekans  $\omega_{rC}$  elde edilir.

$$\omega_{rC} = \frac{U_{sm}}{\Psi_{PM}} \quad (7)$$

$\omega_{rA}$  pozitif sabit moment limitindeki maksimum hız olmak üzere,  $0 < \omega_r < \omega_{rA}$  olduğu bölgeye sabit moment bölgesi diye adlandırılır. Bu bölgede yüksek performans elde etmek için Amper Başına Maksimum Moment (Maximum Torque Per Ampere (MTPA)) kontrol stratejisi uygulanabilir.  $\omega_{rA} < \omega_r < \omega_{rC}$  olduğu bölgeye kısmi alan zayıflatma bölgesi denir. Bu bölgede yük durumuna göre MTPA veya alan zayıflatma kontrol stratejileri uygulanabilir. Son olarak  $\omega_{rC} < \omega_r$  olduğu bölge ise yine alan zayıflatma kontrol stratejisinin uygulanması gereken tam alan zayıflatma bölgesidir.

### 2.1. Sabit Moment Bölgesinde Kontrol

Sabit moment bölgesinde MTPA kontrol stratejisi kayıpları azaltmak için kullanılabilir. Stator akımı  $i_s$ 'nin genliği doğrudan moment üretimine bağlıdır. Bu bağlamda MTPA için d ve q eksen akım vektörleri aşağıdaki gibi türetilir.

$$i_d^* = \frac{\Psi_{PM}}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\Psi_{PM}^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (8)$$

$$i_q^* = \text{sign}(i_s) \sqrt{i_s^2 - i_d^2} \quad (9)$$

Bu bölgedeki kontrol (4) numaralı denklem ile tanımlanan akım sınırları içerisinde yapılır.

### 2.2. Alan Zayıflatma Bölgesinde Kontrol

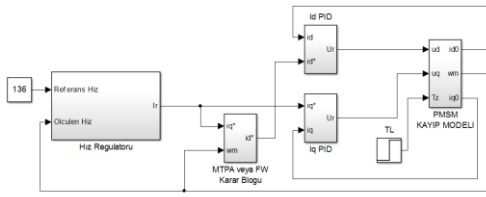
Tepe akım ve gerilim sınırlarının altında kalan bölge Alan zayıflatma bölgesidir. Ayrıca talep edilen moment eğrisi ile gerilim sınır eğrisinin kesiştiği bölge teorik olarak minimum kayıpla çalışmanın mümkün olduğu bölgedir. Kararlı bir sürüş göz önünde bulundurulduğunda istenen hız ve moment değerine göre belirlenecek olan akım vektörü (4) ve (5) ifadeleri ile çevrelenen bölge içerisinde olmalıdır. Burada akım vektörünün tanımlanan bölgeler arasında olduğu ama talep edilen moment eğrisi ile gerilim sınır eğrisinin kesiştiği bölgede olmadığı durumlarda akım vektörünü gerilim limit eğrisine yaklaştırmak suretiyle minimum kayıp kontrolü yapılabilir. Bu durum d eksen akımının aşağıdaki gibi tanımlanmasıyla elde edilebilir.

$$i_d^* = -\frac{\Psi_a}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\frac{v_{sm}^2}{\omega_e^2} - (L_q i_{q0})^2} \quad (10)$$

Alan zayıflatmada kullanılan bu yöntem ile SMSM parametreleri ve yük durumundan bağımsız olan ve DC bara geriliminin ani değişimlerinde oluşan geçici durumlarda kararlı bir yapı elde edilmiş olur. Alan zayıflatmada bu yöntemi kullanarak çalışma noktası talep edilen moment eğrisi ile gerilim sınır eğrisinin kesiştiği bölgeye oldukça yakın bir noktaya taşınabilir.

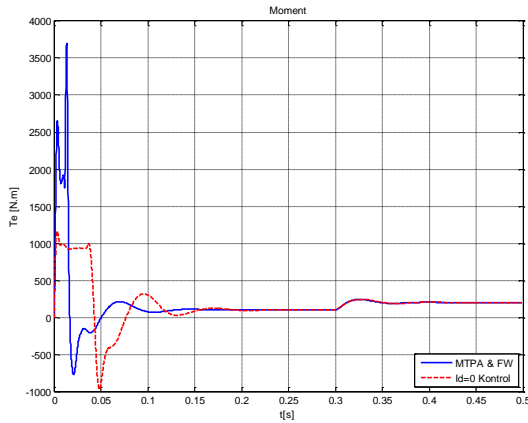
### 3. SMSM Minimum Kayıp Kontrolü Benzetimi

Önceki bölümlerde verilen bilgiler ışığında Maximum Tork Per Ampere (MTPA) ve Alan Zayıflatma (FW) yöntemlerinin birleştirilmesiyle (MTPA&FW) benzetim modeli Şekil 3'teki gibi oluşturulmuştur.

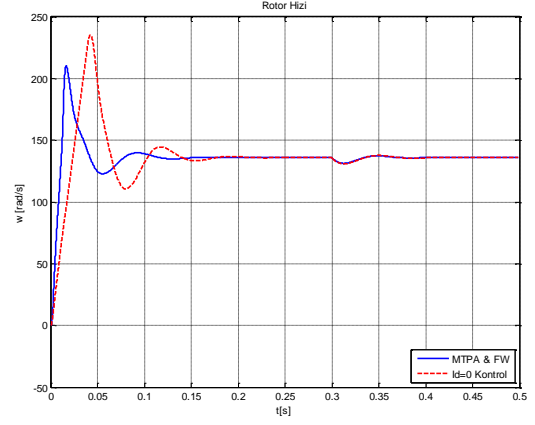


Şekil 3: SMSM Minimum Kayıp Kontrolü Benzetim Modeli

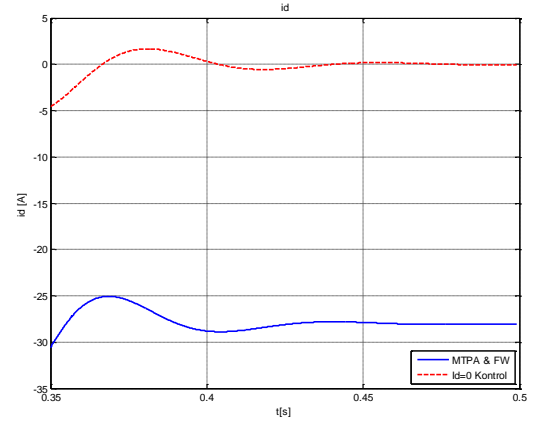
Benzetim çalışmasında motorun hızı 136 rad/s değerinde sabit tutulmuş ve motora uygulanan yük momentini 0.3'üncü saniyede 100 Nm değerinden 200 Nm değerine çıkarılacak şekilde ayarlanmıştır. Değerlendirme yapabilmek amacıyla elde edilen sonuçlar daha önceden yapılmış olan, kayıp kontrolünün olmadığı  $I_d=0$  kontrol yönteminin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4-8'de verilmiştir. Verim, kayıp güç ve  $i_d$  değişimleri, detaylı görülebilmesi için 0.35-0.5 s aralığında çizdirilmiştir.



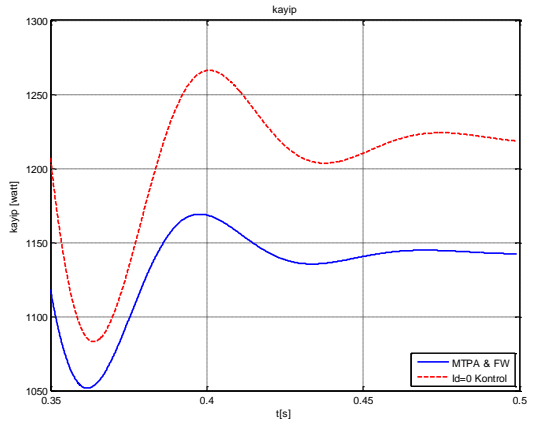
Şekil 4: MTPA&FW ve  $I_d=0$  kontrol yöntemlerinde moment değişimleri



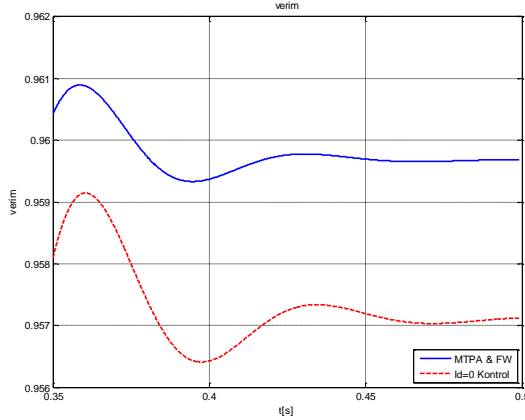
Şekil 5: MTPA&FW ve  $I_d=0$  kontrol yöntemlerinde rotor hızı değişimleri



Şekil 6: MTPA&FW ve  $I_d=0$  kontrol yöntemlerinde  $i_d$  akımı değişimleri



Şekil 7: MTPA&FW ve  $I_d=0$  kontrol yöntemlerinde kayıp güç değişimleri



Şekil 8: MTPA&FW ve  $I_d=0$  kontrol yöntemlerinde motor verimi değişimleri

#### 4. Sonuçlar

Şekil 4 ve Şekil 5’ teki sonuçlar incelendiğinde, tasarlanan SMSM minimum kayıp kontrolünün motorun hızını istenilen hız değeri olan 136 rad/s değerinde başarıyla sabit tuttuğu ve motorun momentini de istenilen şekilde 0.3. saniyeye kadar 100 Nm, 0.3. saniyeden sonra da 200 Nm değerini yüksek başarıyla yakaladığı görülmektedir. Şekil 6’da görüleceği gibi MTPA&FW kontrol başarı ile  $i_d$  akımının negatif değerlere çekebilmiş, bunun sonucu olarak da Şekil 7’de görüldüğü üzere kayıp güç yaklaşık 100 W kadar azaltılmış ve Şekil 8’de görüldüğü üzere motor verimi de yaklaşık 0.003 kadar artırılmıştır.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Gieras, J. F., Wing, M. *Permanent magnet motor technology : Design and Application. 2nd Revised and expanded edition, USA* : Dekker, 2002. 590 p. ISBN 0-8247-0739-7.
- [2] Nakai, H., et al. “Development and Testing of the Torque Control for the Permanent- Magnet Synchronous Motor”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*. 3, JUNE 2005, vol. 52, no. 3, s. 800-806.
- [3] Monajemy, R. *Control Strategies and Parameter Compensation for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives*. Blacksburg, Virginia, 2000, 150 p. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Advisor Prof. Krishnan Ramu.
- [4] Morimoto, S., et al., “Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, October 1994, vol. 41, no. 5, p. 511-517.
- [5] Gallegos-Lopez, G., Gunawan, F. S., Walters, J. S., “Optimum Torque Control of Permanent Magnet AC Machines in the Field-Weakened Region”, *IEEE : IAS 2004*, 2004, no. 11, p. 254-260.
- [6] WALLMARK , O., *Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines in Automotive Applications*, Göteborg, Sweden, 2006, p 148, Chalmers university of technology, Research Project, ISBN 91-7291-846-2.

- [7] Fernández-Bernal, F., García-Cerrada, A., Roberto, F., “Determination of Parameters in Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors With Iron Losses Without Torque Measurement”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 2001, vol. 37, no. 5, p. 1256-1272.
- [8] S.M.Sue, C.T.Pan, Y.C.Hwang “A New Field-Weakening Control Scheme for Surface Mounted Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives”, *Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2007, pp. 1515-1520
- [9] M. A. Khan, M. N. Uddin, M. A. Rahman “A New Loss Minimization Control of Interior Permanent Magnet Motor Drives Operating with a Wavelet Based Speed Controller”, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 2011
- [10] S.M.Sue, T.W. Hung, J.H.Liaw, Y.F. Li, C.Y. Sun, “A New MTPA Control Strategy for Sensorless V/f Controlled PMSM Drives” *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011
- [11] S. Vaez, M.A. Rahman “An On-line Loss Minimization Controller for Interior Permanent Magnet Motor Drives”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, 2009

#### Ek A

##### Seçilen Motor Parametreleri

$U_{nom}$ [V]	102
$I_{nom}$ [A]	203,7
$p_p$ [-]	4
$R_a$ [ $\Omega$ ]	0,0281
$\Psi_{PM}$ [Wb]	0,1883
$L_d$ [mH]	0,3286
$L_q$ [mH]	0,6089
$R_c$ [ $\Omega$ ]	44,228
$J$ [kgm <sup>2</sup> ]	0,147