



# Sabit Mıknatıslı Senkron Makinelerde Endüktans Ölçüm Yöntemlerinin İncelenmesi

## A Review of Inductance Measurement Methods in Permanent Magnet Synchronous Machines

Duygu Turkdemir Gundogan, Ahmet Faruk Bakan

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
md.turkdemir@gmail.com, fbakan@yildiz.edu.tr

### Özet

Sabit mıknatıslı senkron makine (PMSM), elektrikli araçlar, savunma sanayi, havacılık ve uzay teknolojileri, tıbbi cihazlar gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. PMSM'lerin kapsamlı olarak analiz edilmesi ve yüksek performanslı kontrolcü tasarımı için makine parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Özellikle  $d$  ve  $q$  eksenli endüktansları, PMSM'nin geçici durum ve kararlı durum analizlerinde önemli bir etkiye sahiptir. Endüktans değerlerini teorik olarak hesaplamak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Uygulamada endüktans değerlerinin değişmesi nedeniyle ölçüm zorlukları bulunmaktadır. Bu nedenle parametrelerin doğru ölçülmesi için yeni yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı PMSM'lerde kullanılan bazı endüktans ölçme yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

### Abstract

Permanent magnet synchronous machine (PMSM) is widely used in industrial applications such as electric vehicles, defense industry, aerospace technologies, medical devices. For comprehensive analysis of PMSMs and design of high performance controllers, knowledge of machine parameters is necessary. Especially the  $d$  and  $q$  axis inductances have a significant impact on the transient and steady state analysis of PMSM. Many methods have been developed to calculate the inductance values theoretically. In practice, there are measurement difficulties due to the change of inductance values. Therefore, new methods are needed for accurate measurement of parameters. In this study, some inductance measurement methods used in surface magnet and embedded magnet PMSMs have been comparatively examined.

### 1. Giriş

Günümüz endüstrisinde yüksek verimli, dinamik performansı yüksek, dayanıklı, bakım masrafları az olan elektrik makinelerine talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle, sabit mıknatıslı senkron makineler (PMSM) yüksek güç yoğunluğu, yüksek moment yoğunluğu, alan uyarımından kaynaklanan kayıpların olmaması, daha yüksek verim, yüksek güç faktörü (PF), bakım gerektirmeyen yapıya sahip olması ve güvenilirlik gibi birçok avantajlarından dolayı hibrit ve elektrikli araçlar,

savunma sanayi, uzay ve havacılık teknolojileri, tıbbi cihazlar vb. endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Mıknatısların oluşturduğu sabit manyetik alan sayesinde makinedeki kayıpların düşük ve verimin yüksek olması sağlanır [1]. Diğer makine türleri ile karşılaştırıldığında PMSM ile daha küçük hacimlerde yüksek güçler elde edilebilir. Kullanımı yaygınlaşan bu makinelerin verimlerini ve performanslarını artırmaya yönelik birçok çalışma yapılmaktadır [2, 3, 6, 11-13, 17, 18].

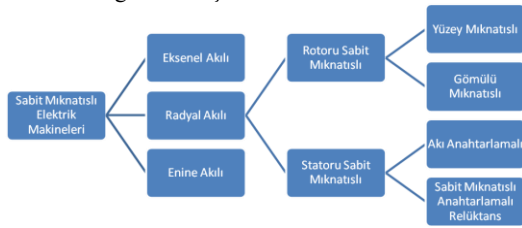
PMSM'nin dinamik performansını artırmak ve moment dalgalanmasını azaltmak amacıyla kontrolcü tasarımı gereklidir. Tasarlanan kontrolcünün etkinliği makinenin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine bağlıdır. Makinenin kontrolü için çalışma esnasında hız, konum bilgisi, faz akımları vb. bazı bilgilerin kontrolcü tarafından kullanılması gerekir. Son yıllarda, sensör maliyetleri, sensörlerden kaynaklanabilecek okuma hataları, makine ve kontrolcü arasındaki bağlantıların karmaşık hale gelmesi, gürültü problemleri vb. sorunlar nedeniyle sensörsüz sürücü sistemleri üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır [2-4]. Sensörsüz sürücü yöntemleri genellikle makine akım, gerilim ve parametrelerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesine dayanır. Bu yöntemlerin etkinliği, makinenin doğru bir analitik modelinin oluşturulmasına bağlıdır. Makinenin karmaşık geometrik yapısının etkileri ve manyetik doyumluk, girdap akımları gibi doğrusal olmayan manyetik davranışların etkilerinin sadece makinenin analitik modeliyle hesaplanması oldukça zordur.

Makine tasarımında, üretilen momentin, endüklenen gerilimin tahmin edilmesi ve makinenin belirli kısımlarındaki (dişler, oluklar vb.) akı yoğunluklarının belirlenmesi için hava boşluğundaki manyetik alan dağılımı bilgisi esastır. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi (FEA) gibi sayısal teknikler, makine tasarımı ve performans analizi ile pratik ve doğru manyetik alan hesaplamaları için kullanılmaktadır. Ancak bu şekilde yapılan analizler oldukça zaman alıcı olduğundan, basit ve işlevsel olarak doğru hesaplamalara ihtiyaç duyulabilmektedir. Hesaplamaların doğru yapılabilmesi için manyetik alan ve eşdeğer devrenin birlikte analiz edilmesi tercih edilir. Sonuç olarak, PMSM uygulamaları veya sürücülerin başarılı bir performans sağlayabilmesi açısından PMSM'in doğru analitik modellenmesi oldukça önemlidir.

## 2. PMSM'lerin Genel Yapısı ve Matematiksel Modeli

### 2.1. PMSM'lerin Genel Yapısı

Sargı kullanımına gerek kalmaksızın makinenin ihtiyaç duyduğu manyetik alanı üretebilmek için mıknatıslar kullanılır. Bu sayede bakır kaybı önlenmiş olur ve makinenin verimi artar. Mıknatısların kullanılması elektrik makinelerinin daha yüksek güç ve moment yoğunluğuna sahip olmasını sağlar. Mıknatıslar statorda veya rotorda bulunabilir. PMSM'leri sınıflandırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır [4, 5]. Genel olarak mıknatısın bulunduğu konum, mıknatıs türü, makinenin moment üretme prensibi ve zıt-EMK dalga şekillerine göre PMSM'ler farklı isimlerle sınıflandırılmaktadır. Mıknatısların elektrik makinelerindeki konumları manyetik akı yollarını ve elektrik makinesinin elektromanyetik davranışını belirlemektedir. PMSM'ler akı yollarına göre eksenel, radyal ve enine akılı olmak üzere üç gruba ayrılır. Şekil 1'de PMSM'lerin sınıflandırılması gösterilmiştir.

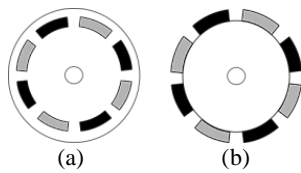


Şekil 1: Temel olarak PMSM'lerin sınıflandırılması.

Radyal akılı makineler yaygın olarak kullanılmaktadır. Mıknatısları rotorda olanlar yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı makineler; mıknatısları statorda olanlar ise akı anahtarlama sabit mıknatıslı makineler ile sabit mıknatıslı anahtarlama relüktans makineler olarak sınıflandırılabilir. Yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı makineler sarım şekillerine göre dağıtılmış ve konsantre sargılı olmak üzere ikiye ayrılır.

### 2.2. Rotoru Sabit Mıknatıslı Makineler ve Matematiksel Modeli

Mıknatısların rotorda yer aldığı makineler endüstride yaygın olarak kullanıldığından bu çalışmada yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı makinelere odaklanılmıştır. Şekil 2'de temel rotor yapılarına göre PMSM'ler gösterilmiştir.



Şekil 2: Temel rotor yapılarına göre PMSM'ler, a) Gömülü mıknatıslı, b) Yüzey mıknatıslı.

PMSM'lerin öz ve karşıt endüktansları rotor konumuna göre değiştiği için makinenin dinamik olarak modellenmesi zorlaşmaktadır. Bu yüzden endüktans değerleri matematiksel olarak Clarke ve Park dönüşümleri ile rotor konumundan bağımsız hale getirilebilmektedir. Gömülü mıknatıslı ve yüzey mıknatıslı makinelerde bu dönüşümler rotor referans alınarak yapılır. Burada  $d$  eksenini sadece mıknatıslardan dolayı oluşan akı yolunu,  $q$  eksenini ise  $d$  eksenine dik olan eksenini ifade eder.

Çok fazlı senkron makinelerin analitik modelleri rotor, stator ve dönen kütleler için oluşturulan denklemler ile ifade edilir. Ancak PMSM'lerin rotorlarında sargı bulunmadığından rotor denklemleri kullanılmamaktadır. PMSM'nin temel  $d-q$  eksenini faz diyagramına göre (1) ve (2)'de  $d-q$  eksenini gerilim denklemleri, (3) ve (4)'te halkalanan akı bağıntıları verilmiştir. Burada,  $R$  faz başına direnci,  $I_d$  ve  $I_q$   $d-q$  eksen akımlarını,  $L_d$  ve  $L_q$   $d-q$  eksen endüktanslarını,  $\Psi_d$  ve  $\Psi_q$   $d-q$  eksen akılarını,  $\omega_e$  (rad/s) milin elektriksel hızını,  $\omega_m$  (rad/s) milin mekanik hızını,  $P$  çift kutup sayısını,  $\Psi_M$  mıknatıs akısını ifade etmektedir.

$$V_d = RI_d + d\Psi_d/dt - \omega_e\Psi_q \quad (1)$$

$$V_q = RI_q + d\Psi_q/dt + \omega_e\Psi_d \quad (2)$$

$$\Psi_d = L_d I_d + \Psi_M \quad (3)$$

$$\Psi_q = L_q I_q \quad (4)$$

$$\omega_e = P\omega_m \quad (5)$$

Kararlı halde PMSM'nin dönen eksen takımındaki akı bağıntıları ve hızı sabit kabul edilir. Bu durumda  $d-q$  eksenini gerilim denklemlerindeki zamana bağlı bileşenler sadeleştirilerek (6) ve (7)'deki gibi ifade edilebilir.

$$V_d = RI_d - \omega_e\Psi_q \quad (6)$$

$$V_q = RI_q + \omega_e\Psi_d \quad (7)$$

PMSM'ler için kararlı durumdaki elektromanyetik moment (8)'deki gibi ifade edilebilir.  $d-q$  eksenini akı ifadeleri (8)'de yerine yazılırsa elektromanyetik moment (9)'daki gibi yazılır.

$$T_e = (3/2)P(\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) \quad (8)$$

$$T_e = (3/2)P(\Psi_M I_q + [L_d - L_q] I_d I_q) \quad (9)$$

PMSM'in geleneksel analitik modellerinde, stator sargılarında depolanan enerjiden dolayı üretilen moment ile vuru momentini gibi bazı bileşenlerin ihmal edildiği görülmektedir. Aynı zamanda makinenin çalışması esnasında kutupların yer değiştirmesi, döner manyetik alan, zıt elektromanyetik kuvvet (zıt-EMK),  $d-q$  eksen akımları gibi faktörlerin etkisi ile makine parametrelerindeki değişimler dikkate alınmamaktadır. Bu bileşen ve değişimler makine yapısına bağlı olarak makinenin kontrolü üzerinde çok etkili olabilmekte, moment dalgalanmaları ve dinamik performansın bozulması gibi olumsuz etkiler oluşturabilmektedir [6]. Doğru parametre bilgisi, hem simülasyon çalışmaları hem de sürücü sistemleri için moment tahmini ve akı zayıflatma yöntemleri gibi çeşitli kontrol algoritmalarının tasarlanabilmesi açısından oldukça önemlidir. FEA ile parametrelerdeki değişimler yüksek doğrulukta analiz edilebilmesine rağmen özellikle üretim farklılıkları nedeniyle pratikte makine parametrelerinin tam olarak belirlenebilmesi için doğru ölçüm yöntemleri gerekmektedir. Bu ihtiyaçtan dolayı makine parametrelerinin ölçülmesi ve hesaplanması üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

### 3. PMSM'lerde Kullanılan Endüktans Ölçüm Yöntemleri

PMSM'lerde kullanılan mıknatıslar sabit akı kaynağı olup alan uyarıtımları değiştirildiğinde de makine üzerindeki etkileri devam etmektedir. Bu nedenle senkron makineler için geliştirilen bazı performans test standartları ve ölçüm yöntemleri [7,8], PMSM'lerde doğrudan kullanılamamaktadır. Bu nedenle PMSM'lerin parametre analizleri üzerine çalışmalar yapılmıştır [9-12]. Fakat bu çalışmaların çoğunda özel laboratuvar test sistemlerinin kurulması önerilen yöntemlerin diğer araştırmacılar tarafından kullanılabilirliğini zorlaştırmaktadır.

Stator direnci, DC testler ve [14, 15]'deki ölçüm standartlarına göre ölçülebilmektedir. Sabit mıknatısın artık akı yoğunluğu ile kalıcı manyetik halkalanan akı elde edilebilir. Fakat  $L_d$  ve  $L_q$  endüktansları, rotor konumuna,  $d$  ve  $q$  eksen akımlarına ve bunların çapraz kuplaj etkilerine göre doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir [1].

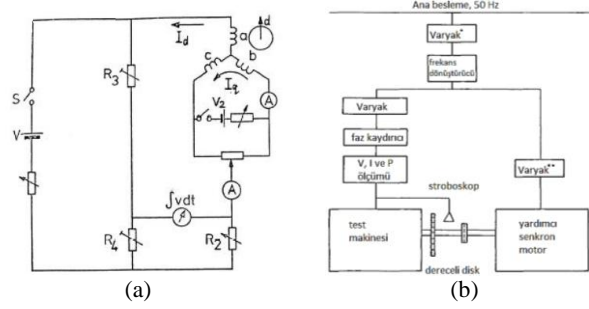
### 3.1. $d$ - $q$ Eksen Parametreleri Arasındaki Etkileşimi Belirlemek İçin Kullanılan Çift Köprü Devresi Ölçüm Yöntemi

[9] nolu çalışmada PMSM'nin  $d$ - $q$  reaktanslarını ölçmek için makinenin yüklü çalışma koşullarında ve sabit durumda uygulanmak üzere iki farklı endüktans ölçüm yöntemi önerilmiştir. Durma testlerinde, Şekil 3 (a)'da gösterilen özel bir çift köprü devresi ile  $d$ - $q$  eksen parametrelerinin birbirleri üzerindeki etkileri gözlenmeye çalışılır. Makinenin B ve C fazları kısa devre edilerek birbirine bağlanır. Ardından sargılar, rotor  $0^\circ$ 'de A fazı manyetik ekseninde sabit tutulurken doğru akım ile uyarılır. Devrede sekonder gerilim kaynağı  $V_2$ , ana köprü devresini etkilemeden  $I_d$  ile sargıları besler. Bu kaynak, B ve C fazlarının  $d$  eksenini manyetomotor kuvvetleri birbirlerini sönmülediği için  $d$  eksenine katkıda bulunmaz. Böylece  $I_d$  ve  $I_q$  akımları bağımsız olarak kontrol edilirken reaktans değişimlerini belirlemek için statik halkalanan akı ölçümü yapılmaktadır. Yük testlerinde ise, test edilen makine, miline bağlanan ayarlanabilir bir yük ile 50Hz'lik besleme hattı üzerinden sürülmektedir. Hat akımı, yük ayarlanarak değiştirilir ve zıt-EMK'nın, nominal hızda sabit olduğu kabul edilir. Makinenin faz diyagramının oluşturulabilmesi için gerilim, akım, PF ve moment açısı elde edilir. Bununla birlikte  $X_d$  ve  $X_q$  reaktanslarının hat akımına göre değişimi incelenmektedir. Ancak, hattın frekansı sabit olduğundan parametrelerin frekansa bağlı değişimleri gözlemlenmemiş ve yük açısının ölçülmesi için de özel bir yöntem tanımlanmamıştır. Buna karşın, osiloskop üzerinden hat geriliminin dalga şekline göre bir gerilim darbesi üretilerek veya mile bağlı dereceli stroboskopik bir disk kullanılarak yük açısının ölçülebileceği belirtilmektedir. Burada  $I_d$ 'nin sifira yakın olduğu hat akımlarında, ölçülen akım ve yük açıları çok küçük olduğu için  $X_d$  bu bölgelerde ölçülememektedir. Yük testlerinde  $X_d$ 'deki yüksek artış, durma testlerinde gözlenmemektedir. Bu durum  $d$ - $q$  eksen bileşenleri arasındaki çapraz bağlantı ve yük testlerinde denklemelerin çözülebilmesi için zıt-EMK'nın sabit kabul edilmesinden kaynaklanabilir.  $X_d$ , yalnızca yük testleri ile  $I_d$ 'nin mevcut olduğu hat akımlarında elde edilebilir. Yük testleri, yük açısının çıkarılmasına bağlıdır. Yüksek yük akımlarındaki testlerde dirençlerin ısınması ile değerlerinin değişmesi bu köprü devresinin uygulanabilirliğini azaltmaktadır [10].

### 3.2. $X_d$ 'yi Ölçmek için Yöntemler

[11] nolu çalışmada [16]'da önerilen parametre tahmini ile  $I_d=0$  iken  $X_q$ 'yu ölçmek için yeni bir yöntem önerilmiştir. Test edilen makine,  $360^\circ$  yük açısı aralığı için 7.5-50Hz arası farklı besleme frekanslarında skaler olarak kontrol edilmektedir. Her çalışma koşulu için makine uçlarından gerilim, akım ve güç ölçümleri yapılır. Yük açısı, sinüzoidal faz gerilimi tarafından tetiklenen bir stroboskop kullanılarak ölçülmektedir. Uygulanan yöntemler,  $0-90^\circ$  aralığındaki bir dizi yük açısı için belirli bir besleme geriliminde giriş akımı ve gücün ölçülmesini gerektirmektedir. Yük açısına göre  $I_d$  ve  $I_q$  eğrileri oluşturulur ve  $I_d=0$  olan nokta bulunarak  $X_q$  hesaplanır. Bu yöntemde zıt-EMK'nın ve  $X_d$ 'nin, mıknatısların  $d$  eksenindeki etkilerinden dolayı değişen yük altında büyük ölçüde sabit kaldığı

belirlenmektedir.  $R$ 'nin düşük yük açısı bölgelerindeki değeri, yüksek akımlarda yaklaşık iki katına kadar çıkmaktadır. Bu çalışmada nominal moment değerinde,  $I_d$ 'nin negatif olduğu ve frekans azaldıkça  $I_d$  değerinin azalırken  $I_q$ 'nun değerinin arttığı belirtilmiştir. Bu durum doyum nedeniyle  $L_q$ 'nun azalmasına neden olmaktadır. Önerilen yöntem  $I_d=0$  koşulu için  $X_q$ 'nun ölçülmesi açısından avantajlıdır. Bununla birlikte  $I_d=0$  koşulu günümüzde vektör kontrol yöntemi ile de sağlanabilmektedir. Kullanılan test sistemi Şekil 3 (b)'de verilmiştir. Bu yöntemde, direnç ve endüktans karakteri tam olarak bilinen üç fazlı dengeli bir yük mevcutsa, makine sabit hızda yüklenerek motorun reaktansı ölçülebilir. Bu yöntemde,  $I_d$  ve  $I_q$  akımlarının bağımsız olarak kontrol edilememesi,  $d$ - $q$  eksenleri arasında bir etkileşime neden olabilir.



Şekil 3: a)  $d$ - $q$  eksen parametreleri arasındaki etkileşimi belirlemek için kullanılan çift köprü devresi [9], b) [11] nolu çalışmada kullanılan test sistemi.

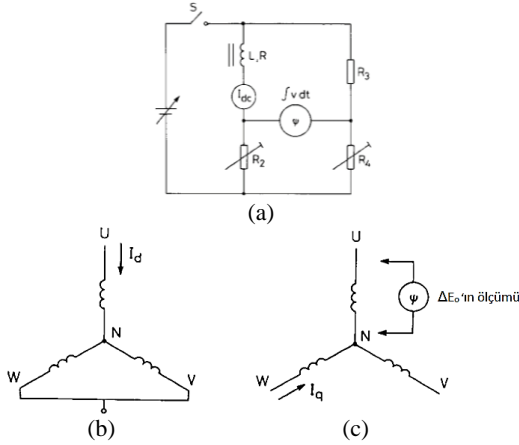
### 3.3. Statik Endüktans Köprüsü Ölçüm Yöntemi

[12] nolu çalışmada, yük açısı ölçümündeki zorluklar nedeniyle yük açısı ölçülmeden  $X_d$ ,  $X_q$  ve zıt-EMK belirlenmeye çalışılmıştır. Test edilen PMSM gerilim kontrolü ile çalıştırılmıştır. Ölçüm için kullanılan statik bir endüktans köprüsü ile  $d$ - $q$  eksen bağlantıları Şekil 6'da verilmiştir. Yüklü ve yüksüz durumlarda,  $X_d$ ,  $X_q$  ve zıt-EMK'nın akıma göre değişimleri belirlenmiştir.  $d$ - $q$  eksen eşdeğer devreleri ile PMSM faz diyagramına göre parametreler belirlenmiştir. Makine yüksüz çalıştırılarak, zıt-EMK, çekirdek kaybı ve farklı gerilim değerlerindeki her akım değeri için  $X_d$  elde edilmiştir.  $X_q$  için ise makine yüklü durumdayken sargılardan biri  $d$ -eksenine hizalanır. Bir sensör kullanılarak, uçlarındaki akım, zıt-EMK ile aynı fazda olana kadar makinenin yük ve gerilim değeri ayarlanır ( $I_d=0$ ). Çalışma testleri sadece 50Hz'de yapılmış, parametrelerin frekansa bağlı değişimleri gözlemlenmemiştir. Bu yöntemde durma ve çalışma testlerinin sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Önerilen yüklü ve yüksüz test yöntemleri,  $I_d$  ve  $I_q$ 'nun bağımsız bir şekilde kontrol edilebilmesi sayesinde vektör kontrolü ile kolayca uygulanabilir. Fakat bu yöntemde kullanılan endüktans köprü devresinin kararlılığı özellikle yüksek akım değerlerinde kontrol edilmelidir. Şekil 4'te statik endüktans köprüsü ve  $d$ - $q$  eksen bağlantı şemaları verilmiştir.

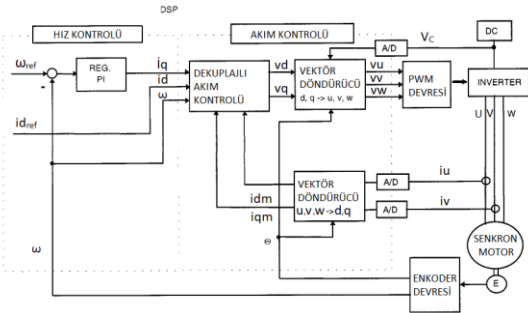
### 3.4. Vektör Kontrollü İnverter ile Tahrik Edilen Motorun Ölçüm Yöntemi

[13]'te PMSM vektör kontrollü inverter sürücü ile tahrik edilmektedir.  $L_d$  ve  $L_q$ 'yu belirlemek için kullanılan test sistemi Şekil 5'te verilmiştir. Akım, gerilim ve güç değişkenleri bir akım kontrolcüsü ile inverter üzerinden kontrol edilir. Ölçülen değerler, hesaplama yapmak için  $d$ - $q$  dönen eksene dönüştürülür. Test edilen makine, bir inverter ile kontrol edilen

bir asenkron motor ile yüklenmiştir.  $I_d$  veya  $I_q$  akımı sıfırda tutulur, sıfır olmayan eksen akımı, nominal değere kadar değiştirilir. Daha sonra eşdeğer  $d$ - $q$  devre modelleri ile elde edilen denklemlerle  $L_d$  ve  $L_q$  hesaplanır. Endüktansların frekansa göre değişimi, 60Hz ve 20Hz çalışma durumları için gözlemlenmiştir. Ancak frekanstan dolayı önemli bir fark belirtilmemiştir. Bu çalışmada, çok düşük akımlarda,  $d$ - $q$  endüktanslarını belirlemek için makine durmakta iken köprü devresi kullanılması önerilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde önerilen yöntemde, akım azaldıkça parametrelerin tahminindeki belirsizlik artmaktadır. Bu çalışmada zıt-EMK'nın değişimi gözlemlenmiştir. Önerilen test yöntemi, test sistemi ve vektör kontrollü bir sürücünün birlikte kullanması sayesinde uygulanabilir.



Şekil 4: a) Statik endüktans köprüsü, b)  $d$  eksenli bağlantısı, c)  $q$  eksenli bağlantısı [12].



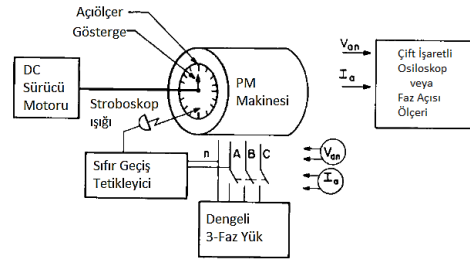
Şekil 5:  $L_d$  ve  $L_q$ 'yu belirlemek için test sistemi [13].

[14]'te  $q$  eksenli reaktansını belirlemek için bazı yöntemler önerilmektedir. Önerilen yöntemlerden biri  $X_d$  değerinden  $X_q$  değerini elde etmek için önemli birkaç makine boyutunun ampirik bir fonksiyonu ile  $X_q/X_d$  oranının belirlenmesidir. Bir diğer yöntem de ise,  $X_q$ 'yu belirlemek için gerilim ve akım ölçümüyle belirlenen yük açısı değerinin kullanılabilmesi belirtilmiştir. Ancak makinenin yük açısının belirlenmesinde zorluklar bulunmaktadır.  $d$  eksenli reaktansı için önerilen yöntem kullanılarak  $X_d$ 'nin kısa devre testi ve armatür akımları ile hesaplanabileceğini belirtilmektedir. Önerilen bu yöntemler sıfır alan uyarımı gerektirmektedir. Fakat PMSM'lerde alan uyarımı olmadığı için bu yöntemler kullanılamamaktadır.

### 3.5. Yardımcı Bir DC Motor ile Jeneratör Olarak Çalıştırılarak Ölçüm Yöntemi

[17] nolu çalışmada PMSM, sunulan diğer çalışmalardan farklı olarak yardımcı bir DC motor ile jeneratör olarak çalıştırılmış ve

reaktansları ölçülmeye çalışılmıştır. Bu yöntemde, test sistemi Şekil 6'da verilmiştir. Test edilen makinenin çıkışlarına dengeli bir üç fazlı yük bağlanır. Yardımcı DC motor ile PMSM tahrik edilir. Rotor miline bağlı bir darbe üretici ile PMSM'in her bir türü için bir sinyal üretilerek sıfır yük açısı ile zıt-EMK ölçülür. Yük açısı stroboskop ile belirlenir. Faz gerilimi ve akımı, PF, yük açısı, zıt-EMK değerleri ölçülerek,  $X_d$  ve  $X_q$  belirlenir. Bu yöntemde PMSM uçlarında ölçülen zıt-EMK'nın, yüksüz halde nominal hızda sabit olduğu kabul edilir. Faz direncinin DC değeri  $d$ - $q$  eksen denklemlerine eklenir. Sunulan yöntem tek bir yük durumu için yapılmaktadır. Bundan dolayı parametrelerin frekansa bağlı değişimi gözlemlenmemiştir.



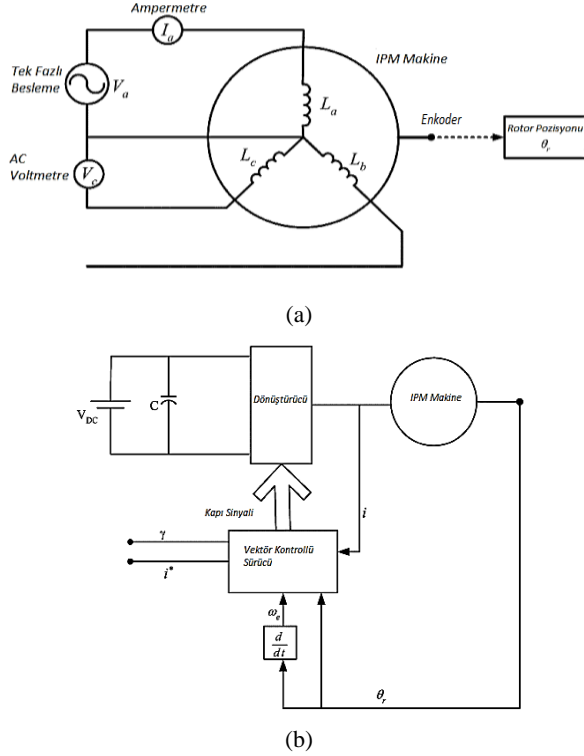
Şekil 6:  $X_d$  ve  $X_q$  değerlerinin belirlenmesi için kullanılan test sistemi [17].

### 3.6. FEA Analizi, AC Durma Testi Yöntemi ve Vektör Kontrol ile Yapılan Ölçüm Yöntemi

[19] nolu çalışmada farklı ölçüm yöntemleri uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Prototip olarak oluşturulan bir PMSM'e aynı akım seviyelerinde FEA yöntemi, AC durma testi ve vektör kontrol ile yapılan test yöntemleri uygulanmıştır.

Ölçüm testleri ile elde edilen endüktans değerlerini doğrulamak için aynı makine, FEA yöntemi ile de analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. PMSM'nin faz diyagramı sadece temel harmonik için geçerlidir [10]. Bu nedenle FFT analizi yapılarak ölçülen gerilim ve akımların temel bileşenleri çıkarılmıştır. Makine çalışırken yapılan testlerde  $I_d$  ve  $I_q$  akımları vektör kontrolü ile kontrol edildiği için yük açısı ölçülmemiştir. Yük açısı ve PF  $d$ - $q$  eksen diyagramlarına göre elde edilmiştir. Parametrelerin frekansa bağlı değişimleri gözlemlenmemiştir.

AC durma testi ve FEA ile elde edilen  $L_q$  değerleri benzer olmasına rağmen vektör kontrol testinde elde edilen değer daha büyüktür. Bu durumun nedeni  $d$  eksenli akısıyla  $q$  eksenli akı yolunun çapraz kuplaj doygunluğu olarak belirtilmektedir. AC durma testi ve FEA ile elde edilen  $L_d$  değerleri tüm akım değerlerinde hemen hemen sabittir. Diğer iki yöntemde ise akım düşük olduğunda dik bir şekilde yükselmektedir. Bu durumun nedeninin rotor yapısındaki demir köprülerin doygunluk seviyesi olduğu belirtilmektedir. Bazı motor yapılarında, eğer demir köprüler iki bitişik mıknatıs kutbu arasındaki kaçak akı tarafından tamamen doyurulursa, akımın  $d$  eksenli akısı üzerindeki etkisi minimumdur. Diğer yandan, bazı rotor yapılarında, demir köprüler, tek başına mıknatıs kaçak akısı tarafından doyuma girmezken, küçük  $I_d$  akımı doyuma neden olabilir. Bu tür bir durumda,  $d$  eksenli akı bağlantısı nispeten daha yüksektir, bu da düşük akım için daha büyük bir  $L_d$  oluşmasına neden olur [10]. Bu çalışmada  $q$  eksenli akımının  $d$  eksenli mıknatıs akı bağlantısı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Mıknatıs akısındaki %10'luk hatanın hesaplanan  $L_d$  değerini etkilediği belirtilmiştir. Şekil 7'de AC durma testi devre bağlantısı ve vektör kontrol test yöntemi blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 7: a) AC durma testi için devre bağlantısı, b) Vektör kontrol test yöntemi blok diyagramı [19].

#### 4. Sonuçlar

PMSM'ler, elektrikli araçlar, savunma sanayi, havacılık ve uzay teknolojileri, tıbbi cihazlar gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. PMSM'lerin makine tasarımı ve analizi ile yüksek performanslı kontrolcü tasarımları için doğru bir makine modeline ihtiyaç vardır. Etkin bir makine modeli için de parametrelerinin doğru bilgisi gereklidir. Çeşitli yöntemlerle veya FEA analizleriyle elde edilen parametre bilgileri, üretimden kaynaklanan değişimler ve çalışma koşulları vb. nedeniyle farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle pratikte makine parametrelerinin ölçüm yöntemlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı PMSM'lerde kullanılan bazı endüktans ölçüm yöntemleri ile avantaj ve dezavantajları incelenmiştir. İncelenen testlerin bir kısmında her çalışma koşulunda test edilen motorun yük açısı belirlenirken, diğerlerinde eksen akımları bağımsız olarak kontrol edilebildiği için PF açısı, yük açısını belirlemek için kullanılır. PMSM makinelerde vektör kontrol yöntemleri ile endüktans parametreleri detaylı olarak elde edilebilir. Böylece kontrolcülerde doğru parametrelerin kullanımı ile makine kontrol performansının artırılması mümkündür.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Ahn, H., Park, H., Kim, C. et al. A Review of State-of-the-art Techniques for PMSM Parameter Identification. *J. Electr. Eng. Technol.* 15, 1177–1187, 2020.
- [2] S. Bolognani, R. Oboe, M. Zigliotto, "Sensorless full-digital PMSM drive with EKF estimation of speed and rotor position", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.46, Issue.1, pp.184-191, Feb 1999.
- [3] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada, Y. Takeda, "Sensorless Control Strategy for Salient-Pole PMSM Based

- on Extended EMF in Rotating Reference Frame", *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 38, No. 4, pp.2637-2644, July/Aug 2002.
- [4] P. Pillay, P. Freere, "Literature Survey of Permanent Magnet AC Motors and Drives", *IEEE Conference Record of the Industry Applications Society Annual Meeting*, pp.74-84, 1989.
- [5] A. Binder, T. Schneider, "Permanent magnet synchronous generators for regenerative energy conversion - A Survey", *European Conference on Power Electronics and Applications*, pp.10, Sep 2005.
- [6] A. Gündoğan and A. F. Bakan, "Precise torque estimation in interior permanent magnet machines," *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 1-4, 2018.
- [7] IEC Pub. 34-4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests, 1985.
- [8] IEEE Standard 115A: IEEE Standard procedures for obtaining synchronous machine parameters by standstill response testing, 1987.
- [9] T.J.E. Miller, "Methods for Testing Permanent Magnet Polyphase AC Motors", *IEEE IAS Conference Record*, pp.494-499, 1981.
- [10] İ. Şahin, *Measurement of Brushless DC Motor Characteristics and Parameters and Brushless DC Motor Design*, Middle East Technical University, Ankara, 2010.
- [11] B.J. Chalmers, S.A. Hamed, G.D. Baines, "Parameters and performance of a highfield permanent-magnet synchronous motor for variable-frequency", *IEE Proceedings*, Vol.132, Pt. B, No.3, pp.117-124, May 1985.
- [12] P. H. Mellor, F. B. Chaaban, K. J. Binns, "Estimation of parameters and performance of rare-earth permanent-magnet motors avoiding measurement of load angle", *IEE Proceedings-b*, Vol.138, Issue.6, pp.322-330, Nov 1991.
- [13] Fidel FB, Aurelio GC, R. Faure, "Determination of Parameters in Interior Permanent- Magnet Synchronous Motors with Iron Losses without Torque Measurement", *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 37, No. 5, pp.1265-1272, Sep/Oct 2001.
- [14] IEEE Standard 115-1995, *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines*, IEEE Std. 115 ISBN 1-55 937-710-0, 1995.
- [15] IEEE Standard 118-1978, "IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement".
- [16] P Eykhoff, "System identification, parameters and state estimation", Wiley, 1974.
- [17] S.F.Gorman, C.Chen, J.J. Cathey, "Determination of Permanent Magnet Synchronous Motor Parameters for Use in Brushless DC Motor Drive Analysis", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.3, No.3, pp.674-681, Sep 1988.
- [18] J.F. Gieras, E. Santini, M. Wing, "Calculation of synchronous reactances of small permanent-magnet alternating-current motors: comparison of analytical approach and finite element method with measurements", *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 34, Issue.5, Part.2, pp.3712-3720, Sep 1998.
- [19] R. Dutta, M.F. Rahman, "A Comparative Analysis of Two Test Methods of Measuring d-q Axes Inductances of Interior Permanent-Magnet Machine", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.42, Issue.11, pp.3712-3718, Nov 2006.