

Üç Fazlı Elektrik Motorları İçin Vektör Kontrolü Algoritmasının Simulasyon Ortamında Tasarımı ve Performans Karşılaştırması

Design and Performance Comparison of Vector Control Algorithm for Three-Phase Electric Motors in Simulation Environment

Mertcan Özdağ¹, Sıddık Murat Yeşiloğlu²

¹Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi

ozdagm20@itu.edu.tr¹, yesiloglu@itu.edu.tr²

Özetçe

Otomotiv sektöründe elektrik motorlarının yaygınlaşmasıyla birlikte bu motorların etkin kontrol yöntemlerinden biri olan vektör kontrol yöntemi de sıklıkla kullanılır olmuştur. Bu çalışmada mıknatıslı senkron motorlar ve asenkron motorların vektör kontrolü üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda öncelikle motorların tork denklemi D ve Q ekseninde verilmiştir. Vektör kontrol yönteminin genel yapısı verildikten sonra vektör kontrol algoritmasının senkron motorlarda ve asenkron motorlarda farklılaştığı yerlere odaklanılmıştır. Daha sonra senkron motorların ve asenkron motorların kontrolünde kullanılan alan zayıflatma algoritması da dahil edilmiştir. Buna ilişkin vektör kontrol diyagramları verildikten sonra ilgili vektör kontrol algoritmaları MATLAB ortamında tasarlanıp simulasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simulasyon sonuçları bildiri kapsamında tartışıldıktan sonra, elde edilen bilgilerden yola çıkarak bu motorları içeren kontrol sistemlerinin karşılaştırması yapılmıştır.

Abstract

With the widespread use of electric motors in the automotive sector, the vector control method, which is one of the effective control methods of these motors, has also been used frequently. In this study, vector control of magnet synchronous motors and asynchronous motors are emphasized. In this context, the equation of the torque produced by these motors is given in D and Q axis. After the general structure of the vector control method has been given, it has been focused on where the vector control algorithm differs in synchronous motors and induction motors. Then, the vector control diagrams including the field weakening algorithm used in the control of synchronous and asynchronous motors were given. The related vector control algorithms were designed using MATLAB environment and simulations were presented. Based on these simulation results and discussions provided, the control systems containing these engines were compared and presented.

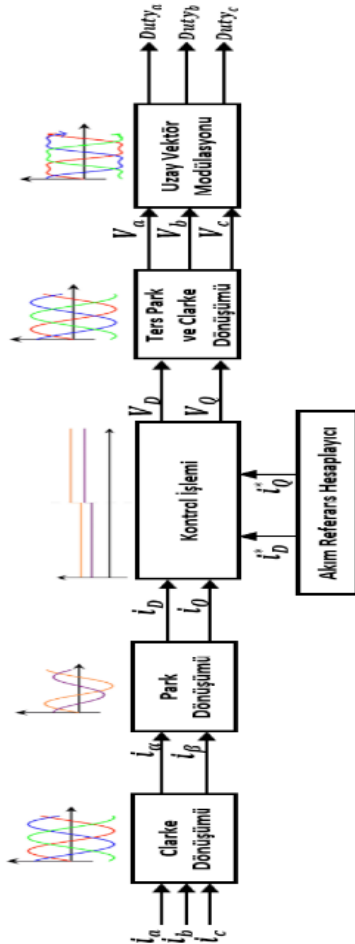
1. Giriş

Vektör kontrol yöntemi rotor manyetik alan vektörünün bulunduğu pozisyon temel alınarak oluşturulmuş bir yöntemdir. Verilen eksen dönüşümleri yapıldığında elde edilen D ve Q eksenleri rotor manyetik alan vektörü ile birlikte hareket etmektedir. Vektör kontrolde kullanılan D eksen genellikle akı ile ilişkilendirilirken, Q eksen ise tork ile ilişkilendirilmektedir. Bunun neticesinde motordan D ve Q ekseninde akımlar akıtılarak motorun torku ve akısı kontrol edilebilmektedir. Vektör kontrol yönteminde motorun sinusoidal büyüklükleri Park ve Clarke dönüşümleri yapıldığında döner rotor eksenine taşındığından artık doğrusal büyüklükler olarak elde edilir. Bu büyüklüklerden biri olan ve motorun sargılarından akan akımlar, elektrik motorlarını kontrol etmek için oldukça önemlidir. Bir elektrik motorunu kontrol etmek demek aslında o motorun ürettiği torku kontrol etmek anlamına gelmektedir ve bir elektrik motorunun torku motordan akan akımla doğrudan ilişkilidir. Bu sebepten ötürü birçok elektrik motor kontrol algoritmasında olduğu gibi vektör kontrol yönteminde de amaç anlık olarak uygulamanın gerektirdiği torku üretecek olan akımları kontrol ederek motorun istenilen performansta çalışmasını sağlamaktır.

Literatürde vektör kontrolü üzerine yapılmış bir çok araştırma bulunmaktadır. 2005 yılında, Aimeng ve arkadaşları bir sürekli mıknatıslı senkron motoru DSP vasıtasıyla vektör kontrol yöntemi ile kontrol ederek radar uygulaması için servo sistemi tasarlamışlardır [1]. 2013 yılında Shen ve arkadaşları akı gözleyicisi kullanarak vektör kontrolde dönüşümlerin yapılmasında kullanılan dönüşüm açısını hesaplayıp sistemde pozisyon sensörünün kullanım gereksinimini ortadan kaldırmışlardır [2]. Yine 2013 yılında Casadei ve arkadaşları bütün üç fazlı elektrik motor çeşitlerinin kontrolü için kullanılabilir bir vektör kontrol yöntemi ortaya koymuşlardır. Bu yöntemi asenkron motor ve gömülü mıknatıslı senkron motorlar üzerinde test edip doğrulamışlardır [3]. 2017 yılında Miao ve arkadaşları vektör kontrol yöntemi ile bir uçak sisteminde kullanılan alternatörü kontrol ederek bu alternatörün değişen hızlarda ürettiği gerilimi sabit tutmaya çalışmışlardır [4]. 2020 yılında Wang ve arkadaşları vektör

kontrolde kullanılan PI kontrolörlerin yerine bulanık mantık kontrolörleri yerleştirerek kontrol başarımını arttırmayı ve böylece daha düzgün tork çıktısı elde etmeyi başarmışlardır [5]. 2023 yılında ise Gholipour ve arkadaşları oldukça gelişmiş bir gözleyici tasarlayarak vektör kontrol algoritmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu gözleyici sayesinde hem dönüşüm açısını hesaplamışlar hem de bir akım sensörünün bozulduğu durumda bozulan akım sensörünün okuyacağı faz akımını tahmin edebilmişlerdir. Bu sayede oldukça kararlı ve dayanıklı bir vektör kontrol sistemi ortaya koyabilmişlerdir [6].

Vektör kontrol yöntemi basitçe, motorun üretmesi gereken torku sağlayacak olan akımların hesaplanmasına ve daha sonra bu akımların kontrolüne dayanan bir algoritmadır. Bu yöntem ile farklı motorlar kontrol edildiğinde ortaya çıkan farklılık genellikle motordan istenen torku üretecek olan D ve Q eksen akımlarının hesaplanması kısmında karşımıza çıkmaktadır. Vektör kontrolde, gereken akımlar hesaplandıktan sonra anlık faz akımları ölçülür ve Park, Clarke dönüşümleri yapılarak motordan akan D ve Q eksen akımları hesaplanır. Daha sonra bu akımlar karşılaştırılarak kontrol gerilimi üretilir ve elde edilen D ve Q eksen kontrol gerilimleri tekrar sinusoidal bileşenlere dönüştürülerek motora uygulanır. Şekil 1’de vektör kontrol algoritmasının genel işleyiş şeması verilmiştir.



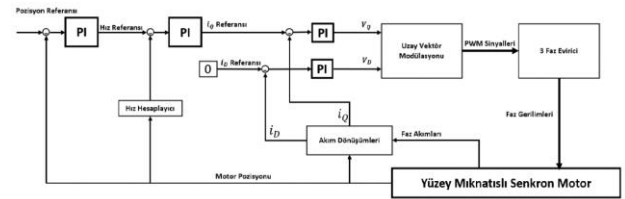
Şekil 1: Vektör kontrol yönteminin genel ilerleyiş diyagramı.

2. Mıknatıslı Senkron Motorların Vektör Kontrolü

Mıknatıslı senkron motorlar rotorlarında mıknatıs bulunan motorlardır. Bu motorlarda mıknatıslar sayesinde rotor manyetik alanı sürekli olarak bulunur ve bu manyetik alanın statorda oluşturulan manyetik alanla etkileşimi sayesinde motorun çalışması sağlanır. Genel anlamda iki mıknatıslı senkron motor çeşiti vardır: Gömülü mıknatıslı senkron motorlar, yüzey mıknatıslı senkron motorlar. Bu motorlar arasındaki fark mıknatısların yerleşiminden gelir ve bu durum motorların çalışma karakteristiklerini değiştirmektedir. Denklem (1) ile mıknatıslı senkron motorların ürettiği torkun ifadesi verilmiştir.

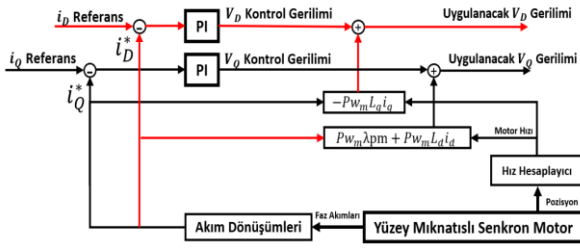
$$Tork = \frac{3p}{2} (\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (1)$$

Yüzey mıknatıslı senkron motorlarda D ve Q eksen endüktans değerleri neredeyse eşittir. Gömülü mıknatıslı senkron motorlarda ise D ve Q eksen endüktans değerleri birbirinden farklıdır ve genellikle Q eksen endüktans değeri D ekseninden büyük olmaktadır. Bu sebepten dolayı yüzey mıknatıslı senkron motorlarda Denklem (1)’de verilen ikinci kısım sıfır olur ve motorun ürettiği tork sadece Q eksen akımına bağlı olur. Gömülü mıknatıslı senkron motorlarda ise tork denkleminde verilen ifadelerin hepsi tork etkiler ve bu sebepten hem D hem de Q eksen akımı tork üretiminde kullanılır. Yüzey mıknatıslı senkron motorların vektör kontrolünde alan zayıflatma gerekeceği durumlarda 0 Amper D eksen akımı ayarlanır. Gömülü mıknatıslı senkron motorlarda ise D ve Q eksen akımlarının birlikte tork üretimine etki etmesi, alan zayıflatma gerektirmeyen durumlarda bile birim akım başına daha fazla tork üretmek amacıyla kullanılması gibi sebeplerden her zaman Q eksen akımıyla birlikte D eksen akımı da motordan akıtılarak tork elde edilmektedir. Şekil 2’de yüzey mıknatıslı bir senkron motoru kontrol etmek üzere oluşturulan bir vektör kontrol algoritmasının şeması verilmiştir.



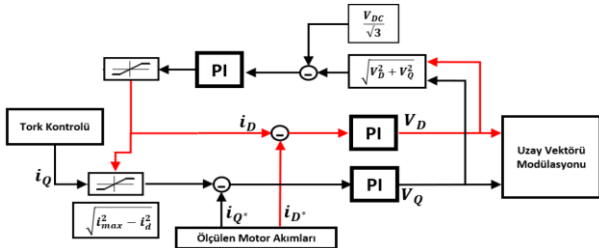
Şekil 2: Vektör kontrol yönteminin şeması.

Şekil 2 ile verilen şema oldukça basittir ve genellikle verilen şekliyle kullanılmaz. Algoritmada kullanılan akım kontrolörlerinin dinamik olarak performansını yükseltmek için öncelikle ileri beslemeli kontrol olarak çalışan dekuplaj kısmı eklenir. Bu kısımda motorun D ve Q eksen zıt-EMK gerilimleri hesaplanır ve akım kontrolörleri tarafından oluşturulan kontrol D ve Q eksen gerilimlerine doğrudan eklenerek kontrolörlerin daha hızlı cevap vermesi sağlanır. Şekil 3 ile bu algoritmanın şematığı verilmiştir.



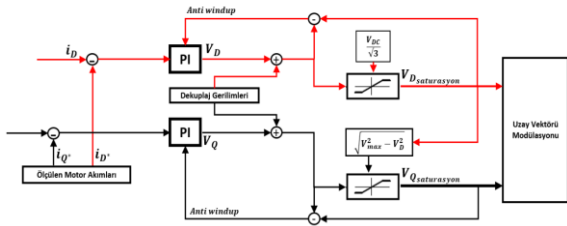
Şekil 3: Vektör kontrolde kullanılan dekuplaj algoritmasının şematığı.

Şekil 2 ile verilen vektör kontrol algoritmasına eklenen bir başka kısım ise alan zayıflatma algoritmasıdır. Bu algoritma motorun ürettiği zıt-EMK gerilimini azaltarak motorun daha yüksek hızlara çıkmasına olanak sağlamaktadır. Bunun için motora uygulanan D ve Q eksen kontrol gerilimlerinin sürekli olarak motora uygulanabilecek en büyük faz geriliminden büyük olup olmaması kontrol edilir. Bunun akabinde motordan negatif değerlerde D eksen akımı akıtılarak alan zayıflatma gerektiği durumlarda kontrol sağlanır ve motorun daha yüksek hızlara çıkmasına olanak sağlar. Şekil 4 ile alan zayıflatma algoritmasının şematığı verilmiştir.



Şekil 4: Vektör kontrolde kullanılan alan zayıflatma algoritmasının şematığı.

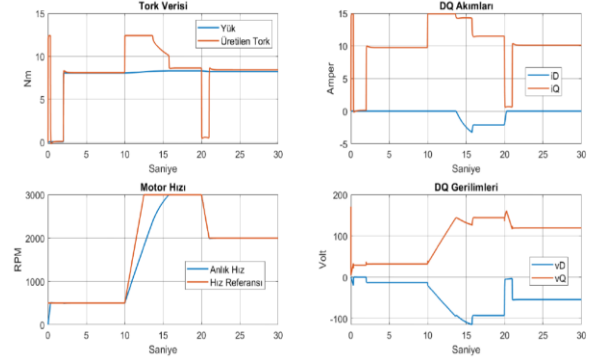
Vektör kontrol algoritması ve genel olarak elektrik motor kontrol uygulamalarında saturasyonlar oluşmaktadır. Saturasyonların olduğu durumlarda kullanılan PI kontrolörlerde integral yığılmasının önüne geçmek için anti-windup yapıları kullanılır. Vektör kontrolde kullanılan anti-windup yapısı ise Şekil 5 ile verilmiştir.



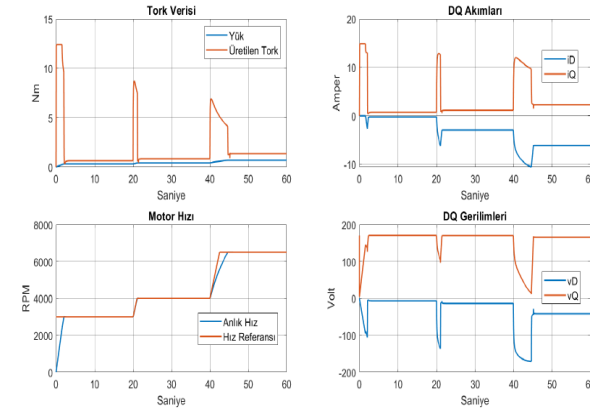
Şekil 5: Vektör kontrol yönteminde kullanılan anti-windup yapısı.

Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5 ile verilen yapılar Şekil 2 ile verilen vektör kontrol yöntemine eklenerek kapsamlı bir vektör kontrol algoritması elde edilir. Bu vektör kontrol algoritmasında yüzey mıknatıslı senkron motor kontrol edilecek olduğunda Q eksen akımının referans değeri doğrudan tork isterine bağlı olurken D eksen akımının referans değeri doğrudan alan zayıflatma algoritmasının değerine bağlı olur ve alan zayıflatma gerekmeyen durumlar 0 Amper olarak referans edilir. Bu bilgiler ışığında MATLAB/Simulink ortamında simülasyonlar

yapıldığında farklı koşullarda sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen sonuçlar elde edilir. Bu sonuçlardan yola çıkarak verilen yöntemin yüzey mıknatıslı bir senkron motoru alan zayıflatma bölgesi dahil olacak şekilde başarılı bir şekilde hız kontrolü yapmaya yeterli olduğu ortaya çıkmaktadır.

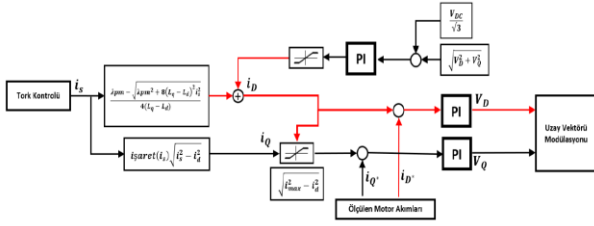


Şekil 6: Yüzey mıknatıslı senkron motorun birinci vektör kontrol simülasyonu.



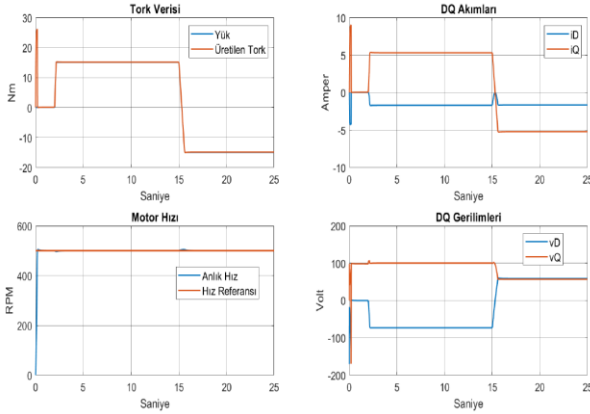
Şekil 7: Yüzey mıknatıslı senkron motorun ikinci vektör kontrol simülasyonu.

Verilen yöntemde yalnızca akımların referans edildiği yer değiştirilerek, yöntemi gömülü mıknatıslı senkron motoru kontrol etmeye elverişli hale getirebiliriz. Bunun için kullanılması gereken yapı Şekil 8 ile verilmiştir. Bu yapıda artık alan zayıflatma bölgesi dışında dahi motordan negatif D eksen akımı akıtılarak tork üretimine katkı sağlanır. Bu sayede gömülü mıknatıslı senkron motorlarda birim akım başına daha fazla tork üretimi sağlanmış olur. Bu durum gömülü mıknatıslı senkron motorları, yüzey mıknatıslı senkron motorlardan daha verimli olmasına yol açar ve genellikle elektrikli araçlar gibi uygulamalarda gömülü mıknatıslı senkron motorların tercih edilmesine sebep olur. Gömülü mıknatıslı senkron motorları sürmek için verilen yeni yöntemde alan zayıflatma algoritması çalıştığında yüzey mıknatıslı senkron motorda olduğu gibi negatif değerlerde bir D eksen akımı hesaplar ve hesaplanan bu D eksen akımı tork üretiminde kullanılan D eksen akımıyla toplanarak kontrol sistemine referans olarak girilir. Bu D eksen akımının bir kısmı alan zayıflatma sağlarken bir kısmı tork üretimine katkı sağlar.

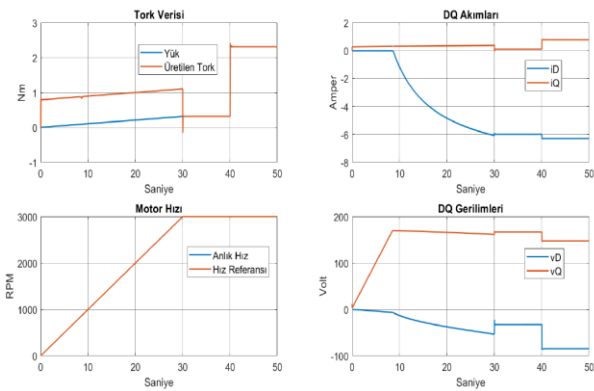


Şekil 8: Gömülü mıknatıslı senkron motorların vektör kontrolünde akım referans değerlerinin hesaplanması.

Gömülü mıknatıslı senkron motorların vektör kontrolünde kalan kısımlar yüzey mıknatıslı senkron motorun vektör kontrolüyle tamamen aynıdır. Bu kapsamda tasarlanan ve düzenlenen Simulink modeli ile simülasyon yapıldığında Şekil 9 ve Şekil 10'da verilen sonuçlar elde edilir. Bu sonuçlardan yola çıkarak verilen yöntemin gömülü mıknatıslı senkron motorlar için de oldukça kararlı bir kontrol ortaya koyduğu söylenebilir.



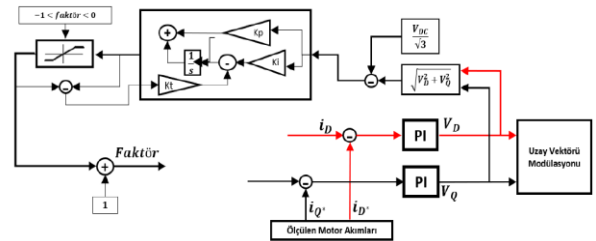
Şekil 9: Gömülü mıknatıslı senkron motorun birinci vektör kontrol simülasyonu.



Şekil 10: Gömülü mıknatıslı senkron motorun ikinci vektör kontrol simülasyonu.

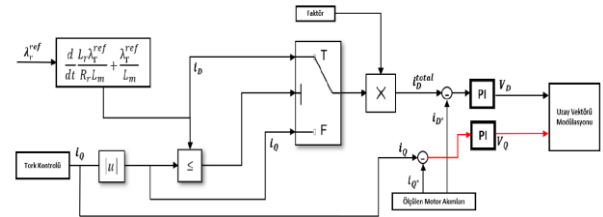
3. Asenkron Motorların Vektör Kontrolü

Asenkron motorların vektör kontrolünde sürekli mıknatıslı senkron motorların vektör kontrolüne göre arzu edilen torku üretecek olan akımların referans değerlerinin hesaplandığı noktada ve dönüşüm açısının hesaplanması kısmında farklılıklar bulunur. Asenkron motorlarda mıknatıs bulunmadığından rotor manyetik alanı stator D ekseninden akan akım vasıtasıyla üretilir. Bu motorlarda alan zayıflatma gerektiren durumlarda sürekli mıknatıslı senkron motorlarda olduğu gibi negatif yönde D eksen akımı akıtılmaz. Bunun yerine daha az miktarda pozitif D eksen akımı atılarak rotor manyetik alan büyüklüğü azaltılır ve böylece motorun ürettiği zıt-EMK azaltılarak alan zayıflatma yapılmış olur. Tasarlanan vektör kontrol algoritmasında bulunan alan zayıflatma yönteminin şematığı Şekil 11 ile verilmiştir. Şekil 11'de bulunan algoritmanın çıktısı bir faktör değeridir. Bu faktör değeri 0 ile 1 arasında değer alabilir. Motorun hızına, DC bara gerilimine ve yüküne bağlı olarak alan zayıflatma algoritması tarafından hesaplanan faktör değeri daha sonra motora referans verilen D eksen akımı değeriyle çarpılarak nihai D eksen akımı referansı hesaplanır.



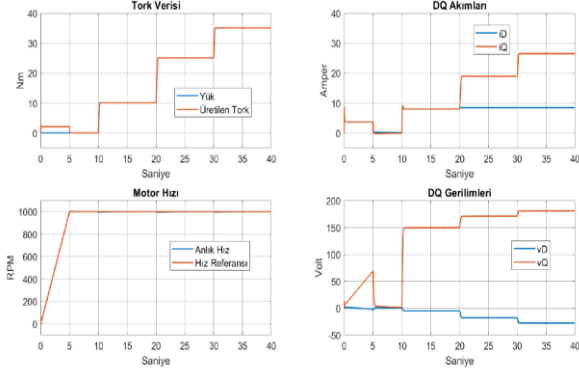
Şekil 11: Asenkron motorların vektör kontrolünde kullanılan alan zayıflatma yönteminin yapısı.

Asenkron motorların gereken torku üretmesi için referans edilmesi gereken akım değerleri ise Şekil 12'de gösterilen algoritma tarafından hesaplanır.

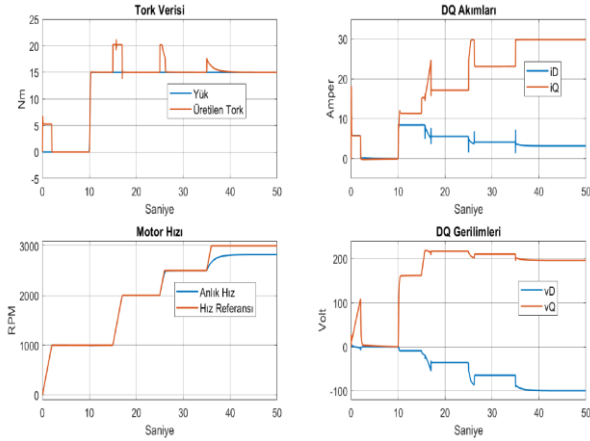


Şekil 12: Asenkron motorların vektör kontrolünde akım referans değerlerinin hesaplandığı kısım.

Asenkron motorların vektör kontrolünde dönüşüm açısı doğrudan rotorun konumunu okuyan sensörler vasıtasıyla elde edilemez. Bu motorların kontrolünde kullanılan dönüşüm açısı rotorun elektriksel hızı ile hesaplanan kayma hızının toplanarak integralinin alınması ile elde edilir. Asenkron motorların vektör kontrolünde bahsi geçen kısımlar haricinde olan diğer kısımlar mıknatıslı senkron motorun vektör kontrol algoritmasıyla tamamen aynıdır. Bu kapsamda anlatılanlar MATLAB/Simulink ortamında tasarlanıp simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 13 ve Şekil 14 yapılan simülasyonların sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlardan hareketle anlatılan yöntemin asenkron motorların hız kontrolünü de kararlı ve kaliteli bir şekilde gerçekleştirebildiği gözükmektedir.



Şekil 13: Asenkron motorun birinci vektör kontrol simülasyonu.



Şekil 14: Asenkron motorun ikinci vektör kontrol simülasyonu.

4. Sonuçlar

Tasarlanan algoritmaların MATLAB/Simulink ortamında simülasyonlarının gerçekleştirilmesi neticesinde elde edilen sonuçlardan yüzey mıknatıslı senkron motor, gömülü mıknatıslı senkron motor ve asenkron motorlar kullanılarak ve bu motorları vektör kontrol ile kontrol ederek oluşturulan sürüş sistemleri hakkında çıktılar elde edilmiş ve bu sistemlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları belirlenmiştir. Yüzey mıknatıslı senkron motorların vektör kontrolünün gömülü mıknatıslı senkron motorların vektör kontrolüne göre daha basit olduğu açıkça görülmektedir. Bu basitlik yüzey mıknatıslı senkron motorlara gömülü mıknatıslı senkron motorlara göre düşük güç yoğunluğu ve düşük performans getirmektedir. Gömülü mıknatıslı senkron motor içeren sistemlerde D ve Q eksen akımları tork üretimine birlikte etki eder. D eksen akımının tork üretimine dahil olması relüktans torku olarak adlandırılan tork bileşeni oluşturur. Relüktans torku sayesinde gömülü mıknatıslı senkron motorlar birim akım başına yüzey mıknatıslı senkron motorlara göre daha fazla tork oluşturur ve bu sayede daha verimli olur. Negatif yönde akıtılan D eksen akımı gömülü mıknatıslı senkron motorlarda relüktans torku oluştururken, gerektiğinde de alan zayıflatma yapılmasını sağladığı için gömülü mıknatıslı senkron motorların ulaşabileceği maksimum hız yüzey mıknatıslı senkron

motorlara göre oldukça fazladır. Bunların yanında yüzey mıknatıslı senkron motorlar genellikle gömülü mıknatıslı senkron motorlardan oldukça ucuz imal edilebilirler. Bu sebeplerden ötürü yüzey mıknatıslı senkron motorlar genellikle pozisyon kontrolü amacıyla tasarlanan servo sistemlerde veya maliyetin çok önemli olduğu elektrikli tahrik uygulamalarında hız kontrolü yapılarak kullanılırken, gömülü mıknatıslı senkron motorlar ise performansın, verimliliğin oldukça önemli olduğu elektrikli araç uygulamaları gibi sürüş sistemlerinde oldukça sık tercih edilmektedir. Asenkron motorlarda rotor manyetik alanını oluşturmak için sürekli olarak D eksen akımı akıtılması gerektiğinden asenkron motorlar çoğu sürüş bölgesinde mıknatıslı senkron motorlara göre düşük verimde çalışırlar. Asenkron motorların vektör kontrolünde dönüşüm açısı hesaplama kısmı gibi karmaşıklıklar bulunduğundan asenkron motorların vektör kontrolünün mıknatıslı senkron motorların vektör kontrolünden daha karmaşık olduğu gözlenmiştir. Asenkron motorların düşük hız ve düşük yük bölgelerinde mıknatıslı senkron motorlara göre oldukça düşük verimde çalıştığı ortaya konmuştur. Buna zıt olarak, alan zayıflatma bölgesinde mıknatıslı senkron motorların asenkron motorlardan daha yüksek akım çektiği ve bu sebepten bazı motorlar için asenkron motorların alan zayıflatma bölgesinde mıknatıslı senkron motorlardan daha verimli olabileceği sonucuna varılmıştır. Bunun neticesinde çok yüksek hız ve çok yüksek güç gerektiren uygulamalarda asenkron motorların mıknatıslı senkron motorlara göre daha etkili bir alternatif olabileceği saptanmıştır.

Kaynakça

- [1] Aimeng, Wang, et al. "DSP-based field oriented control of PMSM using SVPWM in radar servo system." *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005*. IEEE, 2005.
- [2] Shen, Jian-Xin, et al. "Sensorless control of IPMSM using rotor flux observer." *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* 32.1 (2012): 166-181.
- [3] Casadei, Domenico, Alessio Pilati, and Claudio Rossi. "Unified model and field oriented control algorithm for three-phase AC machines." *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*. IEEE, 2013.
- [4] Miao, Dongmin, et al. "Wide speed range permanent magnet synchronous generator design for a DC power system." *Chinese Journal of Electrical Engineering* 3.1 (2017): 33-41.
- [5] Huh, Nam, et al. "Hybrid PWM control for regulating the high-speed operation of BLDC motors and expanding the current sensing range of DC-link single-shunt." *Energies* 12.22 (2019): 4347.
- [6] Wang, Chao, and Z. Q. Zhu. "Fuzzy logic speed control of permanent magnet synchronous machine and feedback voltage ripple reduction in flux-weakening operation region." *IEEE Transactions on Industry Applications* 56.2 (2020): 1505-1517.
- [7] Gholipour, A., et al. "Sensorless FOC Strategy for Current Sensor Faults in Three-Phase Induction Motor Drives." *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* 11.1 (2023): 1-10.