



Comparison of direct model predictive control methods for permanent magnet synchronous motor control

Emrah Zerdali^{1*}, Cenk Kılıç^{1,2}

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Ege University, 35040, İzmir, Türkiye

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Uşak University, 64000, Uşak, Türkiye

Highlights:

- Comparison of direct model predictive control methods
- Application of direct model predictive control methods to permanent magnet synchronous motor
- Evaluation of the compared methods in terms of control performance, design complexity, and computational complexity

Keywords:

- Electric motor drives
- Model predictive control
- Permanent magnet synchronous motor

Article Info:

Research Article

Received: 16.10.2024

Accepted: 09.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1568461

Correspondence:

Author: Emrah Zerdali
e-mail: emrah.zerdali@ege.edu.tr
phone: +90 543 899 3902

Graphical/Tabular Abstract

The combination of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) and direct model predictive control (MPC) methods is well-regarded by the research community, and this topic remains open for further investigation. However, few studies have examined the performance differences among direct MPC methods. To address this gap, this paper presents a comparison of the following direct MPC methods, applied to PMSM control, as shown in Figure A: predictive current control (PCC), predictive torque control (PTC), predictive power control (PPC), and predictive direct speed control (PDSC). The comparison is made in terms of control performance, design complexity, and computational complexity.

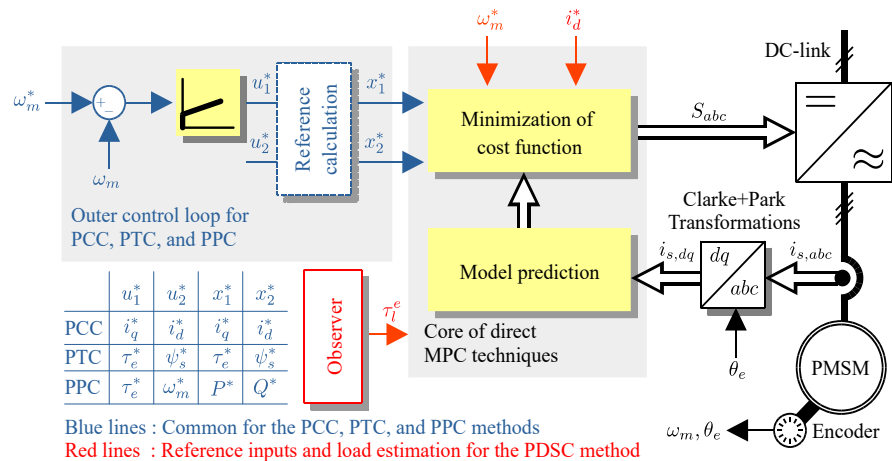


Figure A. Block diagram of the direct MPC-based PMSM drives

Purpose: This paper aims to compare the selected direct MPC techniques applied to PMSM control, considering their control performance, design complexity, and computational complexity.

Theory and Methods: Various MPC methods have been applied to PMSM control, and their control performance, design complexity, and computational complexity may vary depending on the specific application of PMSM control and changing operating conditions of the electric drive. To explore these issues, different speed and load conditions are considered, and several metrics are provided to quantitatively support the graphical results. Additionally, design complexity is assessed based on the use of weighting factors (WFs) and the need for state estimation. Finally, computational complexity, another critical factor in practice, is also evaluated.

Results: The results show that PCC provides sufficient control performance with lower design and computational complexity. While PTC delivers better overall performance, the need for WFs complicates the design phase. PPC offers a WF-free structure, but it performs worse than both PCC and PTC based on the evaluated metrics. PDSC achieves the best control performance; however, it is hindered by high design complexity due to multiple WFs and increased computational complexity resulting from the load torque estimator.

Conclusion: This paper concludes that PDSC is a good option when higher control performance is required, despite its greater design and computational complexity. In contrast, PCC provides sufficient control performance with lower design and computational complexity.



Sabit mıknatıslı senkron motor kontrolü için doğrudan model öngörülü kontrol yöntemlerinin karşılaştırması

Emrah Zerdali^{1*}, Cenk Kılıç^{1,2}

¹Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35040, Bornova, İzmir, Türkiye

²Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 64000, Uşak, Türkiye

ÖNE ÇIKAN LAR

- Doğrudan model öngörülü kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması
- Doğrudan model öngörülü kontrol yöntemlerinin sabit mıknatıslı senkron motora uygulanması
- Yöntemlerin kontrol başarımı, tasarım ve hesaplama karmaşıklığı açısından değerlendirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.10.2024

Kabul: 09.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1568461

Anahtar Kelimeler:

Elektrikli motor sürücüleri,
model öngörülü kontrol,
sabit mıknatıslı senkron
motor

ÖZ

Sabit mıknatıslı senkron motorlar, sundukları üstünlükler nedeniyle birçok alanda yaygın olarak tercih edilmektedir. Diğer taraftan, doğrudan model öngörülü kontrol yöntemlerinin güç dönüştürücüleri ve elektrikli motor sürücülerinin kontrolündeki hızlı gelişimi, bu kontrol yöntemlerinin bu alanlardaki başarısını pekiştirmiştir. Bu çalışma, dört farklı doğrudan model öngörülü kontrol yöntemini sabit mıknatıslı senkron motor kontrolü üzerinden karşılaştırmaktadır. Literatürde bu dört yöntemi bir arada karşılaştıran bir çalışmanın bulunmaması ve mevcut çalışmaların da yalnızca kontrol başarımını göz önünde bulundurması, bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Mevcut karşılaştırmalardan farklı olarak, bu çalışmada ele alınan yöntemler yalnızca kontrol başarımı açısından değil, aynı zamanda tasarım karmaşıklığı ve işlem yükü açısından da değerlendirilmektedir. Karşılaştırmalar benzetim çalışmaları üzerinden yapılmakta olup, elektrikli sürücü sistemlerinin dört bölge çalışma, yük altında hız değişimleri ve sabit hızda yük değişimleri gibi farklı çalışma koşulları dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu dört doğrudan model öngörülü kontrol yönteminin çeşitli çalışma koşulları altında yeterli kontrol başarımına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, başarımlar metrikleri yöntemler arasında farklılıklar ortaya koymaktadır.

Comparison of direct model predictive control methods for permanent magnet synchronous motor control

H I G H L I G H T S

- Comparison of direct model predictive control methods
- Application of direct model predictive control methods to permanent magnet synchronous motor
- Evaluation of the compared methods in terms of control performance, design complexity, and computational complexity

Article Info

Research Article

Received: 16.10.2024

Accepted: 09.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1568461

Keywords:

Electric motor drives,
model predictive control,
permanent magnet
synchronous motor

ABSTRACT

Permanent magnet synchronous motors are widely preferred in many areas due to the advantages they offer. On the other hand, the rapid development of direct model predictive control methods in controlling power converters and electric motor drives has reinforced the success of these control methods in these areas. This study compares four different direct model predictive control methods in the context of permanent magnet synchronous motor control. The main motivation of this study is the absence of research in the literature comparing these four methods and the fact that existing studies focus only on control performance. Unlike the existing comparisons, this study evaluates the selected methods not only in terms of control performance but also in terms of design complexity and computational burden. The comparisons are based on simulation studies, considering various operating conditions of electric drive systems, such as four-quadrant operation, speed variations under load, and load variations at constant speed. The results obtained demonstrate that all these direct model predictive control systems provide sufficient control performance under different operating conditions. However, performance metrics reveal differences among the methods.

1. Giriş (Introduction)

Sabit mıknatıslı senkron motor (permanent magnet synchronous motor - PMSM) yüksek verimlilik, yüksek güç faktörü, daha küçük hacimde daha fazla moment ve güç yoğunluğu, fırçasız yapısının getirdiği düşük eylemsizlik ve zorlu çevre koşullarında çalışma gibi üstünlükleri nedeniyle robotik, elektrikli araçlar ve servo sürücü uygulamaları gibi birçok alanda asenkron motor ve doğru akım motorlarının yerini hızla almıştır. Elektrikleştirme artışıyla birlikte, özellikle ulaşım sektöründe bu motora olan talep önemli ölçüde yükselmiştir. Ancak, PMSM'nin doğrusal olmayan yapısı ve zamanla değişen parametreleri, yüksek performanslı kontrolünü zorlaştırmaktadır [1]. Alan yönlendirmeli kontrol (field oriented control - FOC) ve doğrudan moment kontrolü (direct torque control - DTC) gibi yöntemler, uzun yıllardır bu motorun yüksek başarımlı kontrolü için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Her iki yöntem de yeterli kontrol başarımı sağlasada, kendi kısıtlarına sahiptirler. FOC'un doğrusal yapısı ve ardışık bağlı kontrol tasarımının zorlukları, bu yöntemin en büyük olumsuzluklarıdır [2]. DTC ise basit yapısı ve hızlı dinamik cevaplarına rağmen, moment ve akı dalgalanmaları, yüksek akım harmonikleri, değişken anahtarlama frekansı ve akustik gürültü gibi olumsuzluklara sahiptir. Ayrıca, her iki yöntemin de ek kontrol hedefleriyle genişletilmesi oldukça zordur. Bu durum araştırmacıları daha esnek ve yüksek performanslı kontrol yöntemlerini araştırmaya yöneltmiştir [3]. Son yıllarda, model öngörülü kontrol (MPC), bu sorunları aşmak için güçlü bir aday olarak öne çıkmış ve elektrik makineleri ile güç dönüştürücülerinin kontrolünde giderek daha fazla önem kazanmıştır [4]. MPC yöntemlerinin model bağımlılığı, yüksek akım harmonikleri ve moment dalgalılığı, ağırlık katsayılarının tasarımı ve işlem yükü gibi bilinen zayıflıkları bulunmasına rağmen, son on yılda önerilen etkili yöntemler sayesinde bu zorluklar büyük ölçüde aşılmıştır. MPC'nin temel özellikleri korunarak yapılan bu geliştirmeler, daha etkili yöntemlerin tasarlanmasına olanak tanımış ve bu alanda yoğun araştırmaların sürdürülmesine zemin hazırlamıştır. Özellikle ağırlık katsayılarının çevrimiçi ayarlanması, model kestirim tekniklerinin entegrasyonu ve işlem yükünü azaltmaya yönelik algoritmalar, MPC'nin pratikteki uygulanabilirliğini artırarak, farklı uygulama alanlarında daha geniş bir kullanım imkânı sunmuştur. Bu bağlamda, MPC yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar, hem akademik hem de endüstriyel alanda önemli bir ilgi odağı olmaya devam etmektedir. FOC, DTC ve MPC'nin asenkron motor kontrolü üzerinden ayrıntılı bir karşılaştırması [4]'te bulunabilir.

En yaygın kullanılan MPC yöntemlerinden olan doğrudan ya da sınırlı kontrol setli (finite control set - FCS) MPC'ler basit yapıları, hızlı dinamik cevapları, doğrusal olmayan sistemleri ele alabilme yetenekleri, harici bir modülatör ihtiyacının olmaması ve ek kontrol hedeflerinin kolayca eklenebilmesi gibi üstünlüklere sahiptir [5]. Bu yöntemler, sistemin ayrıklaştırılmış modelini ve güç dönüştürücüsünün ayrık yapısını kullanarak gelişmiş kontrol başarımı sunar. Ayrıca, eviricinin anahtarlama sinyallerini bir modülatöre gerek duymadan doğrudan sağlayabilmesi, kontrol sisteminin karmaşıklığını büyük ölçüde azaltır. Bu yöntemle, kontrol değişkenleri ve aşırı akım koruması gibi ek hedefleri içeren bir maliyet fonksiyonu, eviricinin tüm olası anahtarlama durumları için değerlendirilir. Maliyet fonksiyonunu en aza indiren anahtarlama durumu, bir sonraki adımda uygulanacak anahtarlama durumu olarak seçilir. Maliyet fonksiyonunun esnek bir şekilde tasarlanabilmesi, bu yöntemin en büyük avantajlarından biri olup [6], çeşitli uygulamalara özgü maliyet fonksiyonlarının oluşturulmasına olanak tanır [5]. Literatürde elektrik makinelerinin kontrolünde kullanılan farklı doğrudan MPC yöntemleri yer almaktadır: öngörülü akım kontrolü (predictive current control - PCC) [7, 8], öngörülü moment kontrolü (predictive torque control - PTC) [9, 10], öngörülü güç kontrolü

(predictive power control - PPC) [11, 12] ve öngörülü doğrudan hız kontrolü (predictive direct speed control - PDSC) [13-15]. Bu yöntemlerden PCC ve PTC, asenkron motor kontrolü için [6]'da ayrıntılı olarak karşılaştırılmış, PCC'nin akım harmoniklerinin daha düşük, PTC'nin ise moment dalgalanmalarının daha az olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, PCC'nin PTC'ye kıyasla daha düşük işlem yüküne sahip olduğu belirtilmektedir. PCC, PTC ve PPC yine asenkron motor kontrolü için karşılaştırılmış ve PPC'nin PCC'deki alan yönlendirmesinden kaynaklı sorunların üstesinde geldiği ve PTC'deki ağırlık faktörünün belirlenmesi sorununu ortadan kaldırdığı belirtilmiştir [11, 12]. PCC, PTC ve PPC hız kontrolünü harici bir oransal-integral (proportional-integral-PI) kontrolör üzerinden gerçekleştirdiğinden dolayı ardışık bir yapıya sahiptir. PI kontrolörün yük değişiklikleri gibi bozucu girişlere karşı yetersiz kalması, bu yöntemlerin dinamik durumlardaki hız kontrol başarımını olumsuz yönde etkilemektedir. PI kontrolörün bu olumsuzluklarından kurtulmak için hız kontrolörünü bulanık kontrolör, kayma-kipli kontrolör (sliding mode controller) veya model öngörülü kontrolör ile değiştiren çalışmalar bulunmaktadır [1, 16, 17]. Bu yaklaşımlar ardışıl kontrol mimarisini sürdürmektedirler. Bu olumsuzlukların üstesinden gelebilmek için, PDSC yöntemi önerilmiştir [13-15]. Bu yöntem ile hız kontrolü doğrudan kontrol sistemine dahil edilerek ardışık kontrol yapısından ve uygun kontrolör katsayılarının belirlenememesinden kaynaklı sorunlar ortadan kaldırılmıştır. Diğer taraftan, PDSC, öngörülen hız bilgisini elde edebilmek için yük momenti bilgisine gerek duymaktadır. Moment algılayıcılarının oldukça maliyetli olması ve mekanik kısıtlardan dolayı bazı sistemlere dahil edilmesinin mümkün olmaması araştırmacıları yük momenti bilgisini ölçmek yerine kestirme yöntemlerine yöneltmiştir. Ancak, PDSC'nin başarısının, yük momenti bilgisinin ne derece kaliteli bir şekilde kestirilebildiğine bağlı olması, bu yöntemin olumsuz bir yönünü oluşturmaktadır. Yazarların bilgisine göre, literatürde bu dört doğrudan MPC yöntemini karşılaştıran bir çalışma bulunmamaktadır. Mevcut karşılaştırmalar ise asenkron motor kontrolü üzerinden yapılmaktadır.

Bu makalenin ana katkıları şu şekilde ifade edilebilir: 1) PCC, PTC, PPC ve PDSC yöntemlerinin eşzamanlı karşılaştırılmasının yapılması ve sadece kontrol başarımını dikkate alan diğer karşılaştırma çalışmalarından farklı olarak, tasarım karmaşıklığı ve işlem yüklerinin de değerlendirilmesi. 2) Literatürdeki asenkron motor kontrolüne yönelik karşılaştırma çalışmalarından farklı olarak, bu çalışmada karşılaştırmaların tamamen farklı bir yapıya sahip olan PMSM üzerinden gerçekleştirilmesi. Karşılaştırmalar, PMSM'nin hem dinamik hem de sürekli durum çalışma koşullarını kapsayan farklı çalışma senaryolarının dikkate alındığı benzetim çalışmaları üzerinden yapılmaktadır.

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de PMSM'nin matematiksel modeli sunulmaktadır. Bölüm 3'te, PMSM'nin yüksek başarımlı kontrolü için kullanılan doğrudan MPC yöntemleri tanıtılmaktadır. Bölüm 4'te, farklı çalışma koşulları için bu dört doğrudan MPC yönteminin benzetim sonuçları paylaşılacak ve yöntemler kontrol başarımı, tasarım karmaşıklığı ve hesaplama karmaşıklığı açısından değerlendirilmektedir. Son olarak, Bölüm 5'te karşılaştırılan doğrudan MPC yöntemleri için genel bir değerlendirme yapılmaktadır.

2. PMSM'nin Matematiksel Modeli (Mathematical Model of PMSM)

PMSM'nin dönen eksen takımında (dq –) tanımlanan dinamik modeli Eş. 1'de sunulurken, bu eşitlikte kullanılan elektromanyetik moment ifadesi (τ_e) Eş. 2'de verilmektedir.

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} i_q \omega_r + \frac{1}{L_d} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} i_d \omega_r - \frac{\psi_{pm}}{L_q} \omega_r + \frac{1}{L_q} u_q \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_t} \tau_e - \frac{B_t}{J_t} \omega_m - \frac{1}{J_t} \tau_l \end{cases} \quad (1)$$

$$\tau_e = \frac{3}{2} p_p (\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (2)$$

PMSM'nin yüzey mıknatıslı olduğu düşünülürse, $L_d = L_q = L_s$ olur. Bu durumda, endüklenen moment τ_e , Eş. 3'teki gibi sadeleştirilebilir.

$$\tau_e = \frac{3}{2} p_p \psi_{pm} i_q \quad (3)$$

Eş. 1 – Eş. 3'te, i_d , i_q , u_d ve u_q sırasıyla stator akımının ve geriliminin d – ve q – eksen takımı bileşenlerini, τ_e ve τ_l sırasıyla endüklenen momenti ve yük momentini, ω_r ve ω_m sırasıyla rotorun elektriksel ve mekanik hızını, L_d ve L_q sırasıyla stator endüktansının d – ve q – eksen takımı bileşenlerini, R_s stator direncini, ψ_{pm} sabit mıknatısın halkalama akısını, J_t ve B_t sırasıyla toplam eylemsizliği ve viskoz sürtünme sabitini, p_p kutup çifti sayısını ifade etmektedir.

Doğrudan MPC yöntemleri, bir sonraki zaman adımında evirici anahtarlama sinyallerini seçebilmek için ayrılaştırılmış PMSM modeline ihtiyaç duyar. Bu çalışmada, Eş. 1'deki PMSM modeli ve Eş. 2 ve Eş. 3'teki moment ifadeleri birinci dereceden ileri Euler ayrıklaştırma tekniği kullanılarak, sırasıyla Eş. 4 ve Eş. 5'teki gibi ayrılaştırılmıştır.

$$\begin{aligned} i_{d,k+1} &= \left(1 - \frac{R_s T}{L_d}\right) i_{d,k} + \frac{L_q T}{L_d} i_{q,k} \omega_{r,k} + \frac{T}{L_d} u_{d,k} \\ i_{q,k+1} &= \left(1 - \frac{R_s T}{L_q}\right) i_{q,k} - \frac{L_d T}{L_q} i_{d,k} \omega_{r,k} - \frac{\psi_{pm} T}{L_q} \omega_{r,k} + \frac{T}{L_q} u_{q,k} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \omega_{m,k+1} &= \frac{T}{J_t} \tau_{e,k} + \left(1 - \frac{B_t T}{J_t}\right) \omega_{m,k} - \frac{T}{J_t} \tau_{l,k} \\ \tau_{e,k} &= \begin{cases} \frac{3}{2} p_p (\psi_{pm} i_{q,k} + (L_d - L_q) i_{d,k} i_{q,k}), & L_d \neq L_q \\ \frac{3}{2} p_p \psi_{pm} i_{q,k}, & L_d = L_q \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

Eğer PMSM'nin, Şekil 1'deki gibi iki-seviyeli bir gerilim kaynaklı evirici üzerinden beslendiği varsayılırsa, eviricinin duran eksen takımında ($\alpha\beta$ –) tanımlanan çıkış gerilimi vektörü $\mathbf{u}_{\alpha\beta}$, Eş. 6'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} V_{dc} (S_{1a} + \mathbf{a} S_{1b} + \mathbf{a}^2 S_{1c}) \quad (6)$$

Burada, V_{dc} doğru akım bara gerilim seviyesini, $S_{1x} \in \{S_{1a}, S_{1b}, S_{1c}\}$ eviricinin her bacağındaki üst anahtarın anahtarlama durumunu ve $\mathbf{a}$ 120 elektriksel derecelik faz kaymasını temsil etmektedir. $\alpha\beta$ – eksenindeki bu gerilim vektörünü dq – eksen üzerinde ifade edebilmek için rotorun elektriksel konumu olan θ_r 'nin bilinmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm için ifade Eş. 7'de verilmektedir.

$$\mathbf{u}_{dq} = \mathbf{u}_{\alpha\beta} e^{-j\theta_r} \quad (7)$$

3. PMSM'nin Doğrudan Model Öngörülü Kontrol Yöntemleri (Direct Model Predictive Control Methods of PMSM)

Bu bölümde PMSM'nin yüksek başarılı kontrolü için kullanılan doğrudan MPC temelli dört yonteme dair detaylar verilmektedir.

3.1. PMSM'nin Model Öngörülü Akım Kontrolü (Model Predictive Current Control of PMSM)

Şekil 2'de şeması verilen PCC'de, akımlar ayrılaştırılmış sistem modeli kullanılarak Eş. 8'deki gibi öngörülebilir.

$$\begin{cases} i_{d,k+1}^p = \left(1 - \frac{R_s T}{L_s}\right) i_{d,k} + T \omega_{r,k} i_{q,k} + \frac{T}{L_s} u_{d,k} \\ i_{q,k+1}^p = \left(1 - \frac{R_s T}{L_s}\right) i_{q,k} - T \omega_{r,k} i_{d,k} - \frac{\psi_{pm} T}{L_s} \omega_{r,k} + \frac{T}{L_s} u_{q,k} \end{cases} \quad (8)$$

Geleneksel PCC'de, en uygun gerilim vektörünün seçimi için kullanılan maliyet fonksiyonu ise Eş. 9'da verilmektedir.

$$g(j) = \left(i_{d,k+1}^* - i_{d,k+1}^p(j)\right)^2 + \left(i_{q,k+1}^* - i_{q,k+1}^p(j)\right)^2 + I_{max}(j) \quad (9)$$

Eş. 9'daki maliyet fonksiyonunda, $i_{d,k+1}^*$ ve $i_{q,k+1}^*$ stator akımlarının dq – bileşenlerinin referans değerlerini, j ise uygulanan gerilim vektörünü ifade etmektedir. PMSM'nin yüzey mıknatıslı olduğu durumda ($L_d = L_q$) relüktans momenti oluşmayacağından $i_{d,k+1}^* = 0$ olarak kabul edilir. I_{max} ise PMSM'yi aşırı akımlardan koruyan ek kontrol hedefini ifade eder ve Eş. 10'daki gibi tanımlanır.

$$I_{max} = \begin{cases} \infty, & \text{eğer } |i_s^p| > i_{s,max} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (10)$$

Burada, $i_{s,max}$ izin verilen maksimum stator akımının genliğini ve $|i_s^p| = \sqrt{i_{d,k+1}^p(j)^2 + i_{q,k+1}^p(j)^2}$ öngörülen akımın genliğini göstermektedir.

3.2. PMSM'nin Model Öngörülü Moment Kontrolü (Model Predictive Torque Control of PMSM)

Şekil 2'de şeması verilen PTC'de, akımlar PCC'deki gibi ayrılaştırılmış sistem modeli kullanılarak Eş. 11'deki gibi öngörülebilir.

$$\begin{cases} i_{d,k+1}^p = \left(1 - \frac{R_s T}{L_s}\right) i_{d,k} + T \omega_{r,k} i_{q,k} + \frac{T}{L_s} u_{d,k} \\ i_{q,k+1}^p = \left(1 - \frac{R_s T}{L_s}\right) i_{q,k} - T \omega_{r,k} i_{d,k} - \frac{\psi_{pm} T}{L_s} \omega_{r,k} + \frac{T}{L_s} u_{q,k} \end{cases} \quad (11)$$

Öngörülen akımlar kullanılarak stator akısının d – ve q – bileşenleri Eş. 12'deki gibi ifade edilir. Öngörülen akımlar ve akılar kullanılarak, öngörülen moment Eş. 13 ile hesaplanabilir.

$$\begin{cases} \psi_{d,k+1}^p = L_s i_{d,k+1}^p + \psi_{pm} \\ \psi_{q,k+1}^p = L_s i_{q,k+1}^p \end{cases} \quad (12)$$

$$\tau_{e,k+1}^p = \frac{3}{2} p_p (\psi_{d,k+1}^p i_{q,k+1}^p - \psi_{q,k+1}^p i_{d,k+1}^p) \quad (13)$$

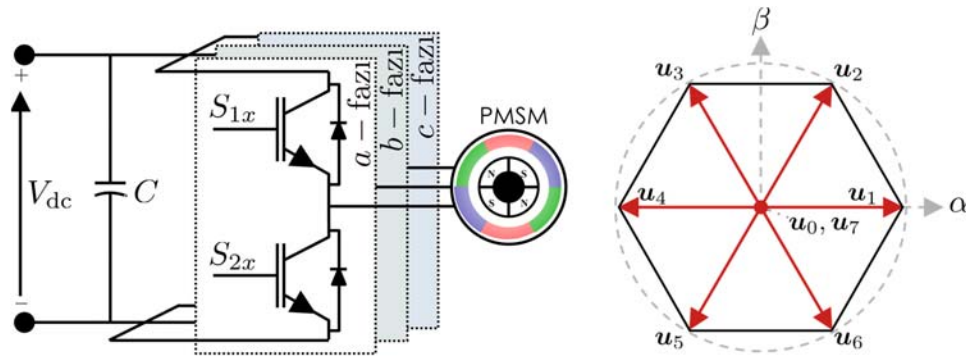
PMSM'nin yüzey mıknatıslı olduğu durumda $i_{d,k+1}^* = 0$ olduğundan, öngörülen moment ifadesi Eş. 14'teki gibi sadeleştirilebilir. Son olarak, moment ve akı kontrolü, Eş. 15'te verilen maliyet fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilir. Bu maliyet fonksiyonunda $\tau_{e,k+1}^*$ ve $\psi_{s,k+1}^*$ sırasıyla moment ve stator akısının referans değişimlerini, λ_ψ akı hatasına ait ağırlıklandırma katsayısını, j uygulanan gerilim vektörünü, I_{max} ise Eş. 10'daki aşırı akım korumasını göstermektedir.

$$\tau_{e,k+1}^p = \frac{3}{2} p_p \psi_{pm} i_{q,k+1}^p \quad (14)$$

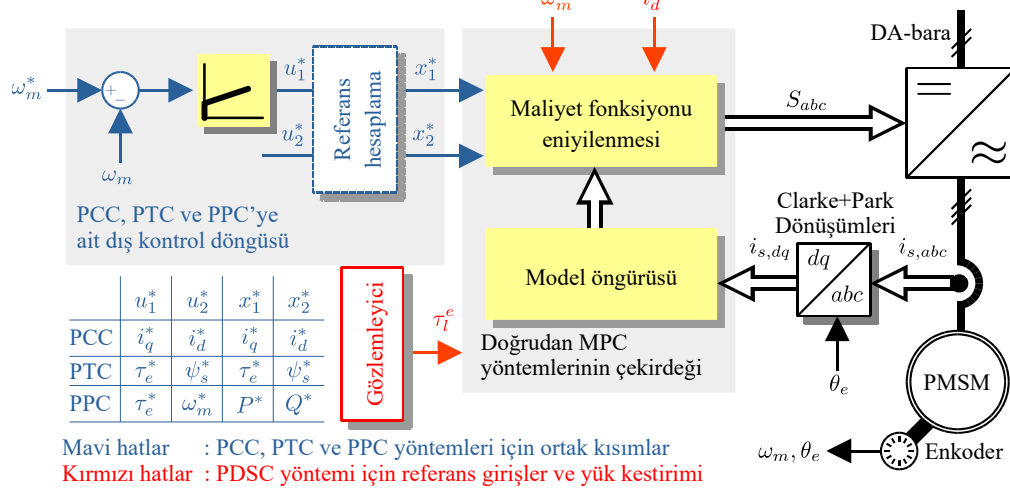
$$g(j) = |\tau_{e,k+1}^* - \tau_{e,k+1}^p(j)| + \lambda_\psi |\psi_{s,k+1}^* - \psi_{s,k+1}^p(j)| + I_{max}(j) \quad (15)$$

3.3 PMSM'nin Model Öngörülü Güç Kontrolü (Model Predictive Power Control of PMSM)

Şekil 2'de şeması verilen PPC'de, öngörülen akım ve akı eşitlikleri PTC ile aynıdır ve Eş. 11 ile Eş. 12'de verilen eşitlikler kullanılarak ifade edilir.



Şekil 1. İki-seviyeli gerilim kaynaklı evirici topolojisi ve olası gerilim vektörleri
(Two-level voltage source inverter topology and possible voltage vectors)



Şekil 2. Doğrudan MPC-temelli PMSM sürücülerinin blok şeması (Blok diagram of direct MPC-based PMSM drives)

PTC'den farklı olarak, bu yöntemde moment kontrolü aktif güç (P) üzerinden, akı kontrolü ise reaktif güç (Q) üzerinden yapılmaktadır. Ayrıca, PTC'deki ağırlıklandırma katsayısının belirlenmesindeki güçlüklerin ortadan kaldırılması, bu yöntemin PTC'ye göre üstünlüğünü oluşturmaktadır [18]. Aktif ve reaktif güce ait ifadeler sırasıyla Eş. 16'da verilmektedir.

$$\begin{cases} P_{k+1}^p = \frac{3}{2} p_p \omega_m (\psi_{d,k+1}^p i_{q,k+1}^p - \psi_{q,k+1}^p i_{d,k+1}^p) \\ Q_{k+1}^p = \frac{3}{2} p_p \omega_m (\psi_{d,k+1}^p i_{d,k+1}^p + \psi_{q,k+1}^p i_{q,k+1}^p) \end{cases} \quad (16)$$

Öngörülen aktif ve reaktif gücün kullanıldığı maliyet fonksiyonu ise Eş. 17’de sunulmaktadır.

$$g(i) = |P_{k+1}^* - P_{k+1}^p(j)| + |Q_{k+1}^* - Q_{k+1}^p(j)| + I_{max}(j) \quad (17)$$

Burada, P_{k+1}^* ve Q_{k+1}^* sırasıyla aktif güç ve reaktif güç için referans değişimlerini, j uygulanan gerilim vektörünü ve I_{max} ise Eş. 10'daki aşırı akım korumasını göstermektedir. P_{k+1}^* çıkış gücü ifadesinden Eş. 18'de kolaylıkla elde edilebilirken, Q_{k+1}^* PMSM'nin yüzey mıknatıslı olduğu düşünüldüğünde, yani $i_{d,k+1}^* = 0$ için, Eş. 12 ve Eş. 14, Eş. 16'da yerine yazılarak Eş. 19'daki gibi hesaplanabilir.

$$P_{k+1}^* = \omega_m^* \tau_e^* \quad (18)$$

$$Q_{k+1}^* = \frac{L\omega_m^*(\tau_e^*)^2}{1.5p_n\psi_{nm}^2} \quad (19)$$

3.4. PMSM'nin Model Öngörülü Doğrudan Hız Kontrolü (Model Predictive Direct Speed Control of PMSM)

Şekil 2’de şeması verilen PDSC, bu makalede ele alınan diğer doğrudan MPC yöntemlerindeki ardışık bağlı yapılar yerine doğrudan hız kontrolüne olanak sağlamaktadır. Bu yöntem, öngörülen hız için mekanik hareket eşitliği kullandığından yük momentini bilgisine gereksinim duymaktadır. Yük momentini ölçmenin maliyetli olması ve moment algılayıcısının şaft bağlantısının her zaman mümkün olmaması nedeniyle, bu çalışmada yük momentini Kalman filtresi (KF) yardımıyla kestirilmiştir. PDSC yönteminde öngörülen akım, akı ve momente ilişkin ifadeler sırasıyla Eş. 11 - Eş. 14’te verilmektedir. Hız, öngörülen elektromanyetik moment (τ_e^p) ve kestirilen yük momentini (τ_l^e) kullanılarak Eş. 20’deki gibi öngörülebilir.

$$\omega_{m,k+1}^p = \frac{T_s}{J_t} (\tau_{e,k+1}^p - \tau_{l,k+1}^e) + \omega_{m,k} \quad (20)$$

Bu kontrol yönteminde, hız kontrolü doğrudan anahtarlama durumlarının seçiminde kullanıldığından, maliyet fonksiyonunda hız hatası terimi de yer almaktadır. Ancak yalnızca hız hatasının kullanılması, uygun olmayan anahtarlama durumlarının seçilmesine yol açabilir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için moment hatasının da eklenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, akı kontrolünün gerçekleştirilmesi için stator akımının d- eksen bileşeni hatası da maliyet fonksiyonuna dahil edilmektedir.

$$g(i) = \lambda_\omega \left(\omega_{k+1}^* - \omega_{k+1}^p(j) \right)^2 + \lambda_\tau \left(\tau_{e,k+1}^p(j) - \tau_{l,k+1}^e \right)^2 +$$

$$\lambda_i \left(i_{d,k+1}^* - i_{d,k+1}^p(j) \right)^2 + I_{max}(j) \quad (21)$$

Eş. 21'deki maliyet fonksiyonunda, ω_{k+1}^* ve $i_{d,k+1}^*$ sırasıyla hız ve akımın d -ekseni bileşenine ait referans değişimlerini, λ_ω , λ_τ ve λ_i sırasıyla hız, moment ve akım hatası terimlerine ait ağırlıklandırma katsayılarını, j uygulanan gerilim vektörünü ve I_{max} ise Eş. 10'daki aşırı akım korumasını göstermektedir.

Yük momentinin kestirilmesi için tasarlanan KF'ye ait ayrıklaştırılmış sistem modeli Eş. 22'de verilmektedir.

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (22)$$

Burada, $\mathbf{x}_k = [\omega_m \quad \tau_l]^T$ durum vektörünü, $\mathbf{u}_k = [i_q]$ girişi ve $\mathbf{y}_k = [\omega_m]$ çıkışı ifade etmektedir. $\mathbf{w}_k$ ve $\mathbf{v}_k$ sırasıyla sistem ve ölçüm gürültülerini temsil etmektedir. Sistem matrisi $\mathbf{A}$, giriş vektörü $\mathbf{B}$ ve ölçüm vektörü $\mathbf{C}$ ise Eş. 23'te verilmektedir.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{T_s}{J_t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} p_p \psi_{pm} T_s \\ J_t \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [1 \quad 0] \quad (23)$$

Yük momentini kestirimi için yukarıdaki sistem modelini kullanan geleneksel KF denklemleri ise sırasıyla Eş. 24 - Eş. 28'de sunulmaktadır [19].

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k-1} \quad (24)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (25)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}^T[\mathbf{C}\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (27)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{C}]\mathbf{P}_{k|k-1} \quad (28)$$

Eş. 24 - Eş. 28'de, $\mathbf{P}_{k|k-1}$ ve $\mathbf{P}_{k|k}$ sırasıyla önceki (priori) ve sonraki (posteriori) hata kovaryans matrisleri, $\mathbf{K}_k$ Kalman kazancını, $\mathbf{Q}$ ve $\mathbf{R}$

sırasıyla sistem ve ölçüm gürültüsü kovaryans matrisleri ve $\mathbf{I}$ birim matrisi göstermektedir.

4. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

Bu bölümde, Bölüm 3'te tanıtılan dört doğrudan MPC yöntemi, yüzey mıknatıslı bir PMSM kontrolü üzerinden detaylı olarak karşılaştırılmaktadır. Benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup, karşılaştırmalarda kullanılan PMSM'nin özellikleri ve benzetimlerde kullanılan parametreler sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmaktadır. Bu çalışmada, ele alınan dört doğrudan MPC yöntemi üç farklı yönden değerlendirilmektedir: 1) kontrol başarımı, 2) tasarım karmaşıklığı, 3) hesaplama yükü.

4.1. Doğrudan MPC Yöntemlerinin Kontrol Başarımı Yönünden Değerlendirilmesi (Evaluation of direct MPC Techniques in Terms of Control Performance)

Tasarlanan doğrudan MPC temelli PMSM sürücülerinin başarımlarını test etmek amacıyla farklı çalışma koşulları göz önünde bulundurulmuştur: 1) dört bölge çalışma, 2) ileri-geri yönde çalışma, 3) basamak şeklindeki yük değişimleri ve 4) farklı eğime sahip hız referansları. Her bir yöntem için kontrol başarımları Şekil 3'te sunulmuş olup, Şekil 3'teki çalışma koşullarına karşılık gelen dört bölge çalışma gösterimi Şekil 4'te verilmektedir. Şekil 3'te belirlenen senaryo, tüm hız bölgelerini ve yük koşullarını kapsamadığından, her bir yöntem için farklı hızlardaki moment dalgalanmaları, hız dalgalanmaları, akım harmonikleri ve ortalama anahtarlama frekansları iki yük durumu (tam yük ve yarı yük) için Şekil 5'te gösterilmektedir.

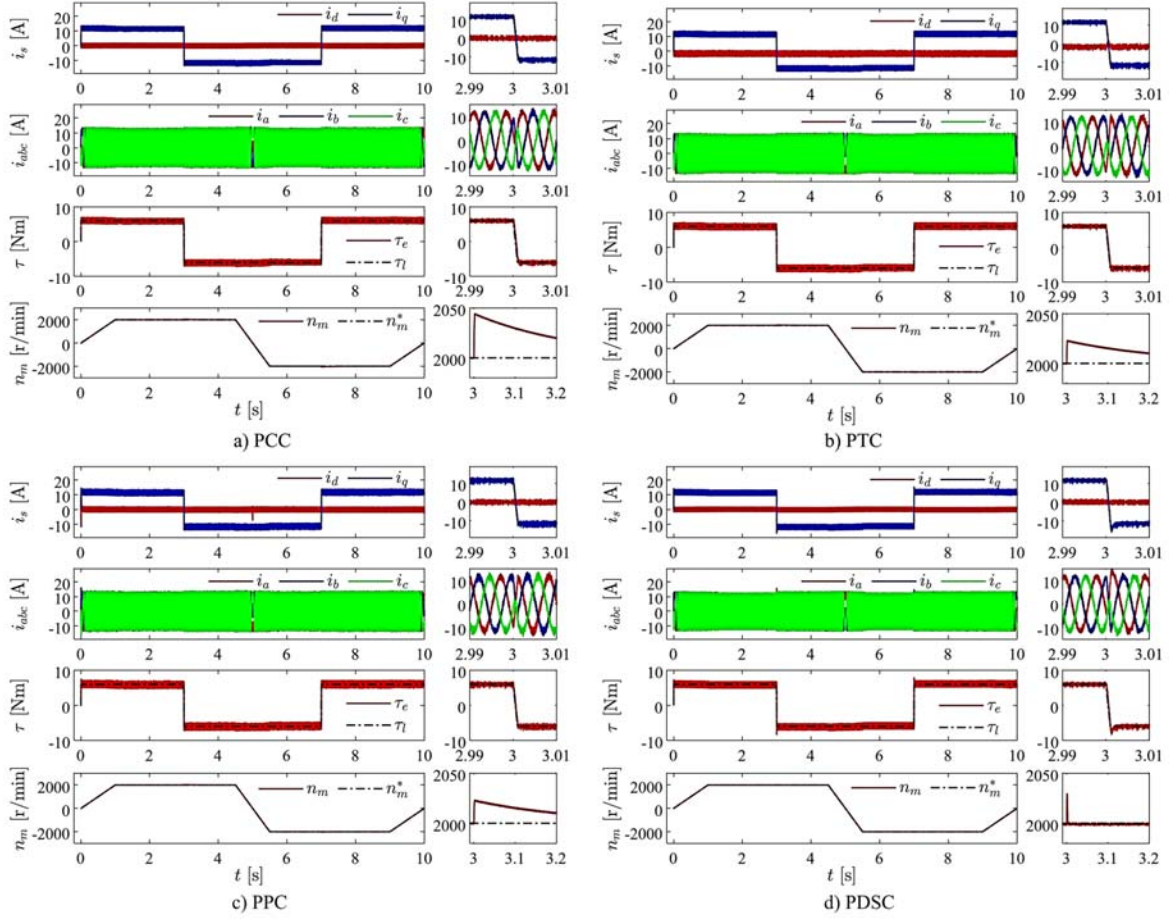
Şekil 3-Şekil 5 sunulan sonuçlar değerlendirildiğinde, tüm kontrol yöntemlerinin dört bölge çalışma için yeterli kontrol başarımına sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, basamak şeklindeki yük değişimi gibi geçici durumlarda, PCC, PTC ve PPC'nin benzer kontrol başarımına sahip olduğu ve PDSC'ye kıyasla bu değişimlerden daha fazla etkilendiği görülmektedir. Bunun nedeni ise, bu üç kontrol yönteminin hız kontrolü döngüsünde kullanılan doğrusal kontrol yapısının (PI kontrolör) bozucu reddetme yeteneğinin zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. PDSC ise doğrusal olmayan kontrol yapısı bozucu girişlerden kaynaklanan olumsuz etkii hızlı bir şekilde bastırmaktadır.

Tablo 1. Benzetim çalışmalarında kullanılan PMSM'nin özellikleri (The specification of the PMSM used in the simulation studies)

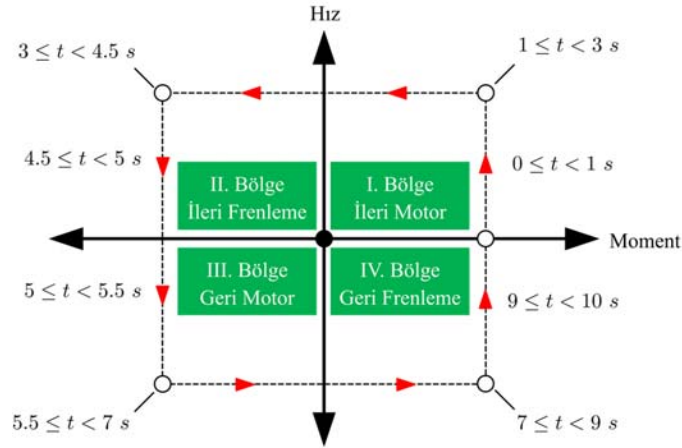
Parametre	Değer	Parametre	Değer
R_s	0.62 [Ω]	ψ_{pm}	0.08627
L_s	0.002075 [H]	p_p	4
J_t	0.0003617	n_m	4500 [d/dk]
B_t	9.444e-5	τ_l	6 [Nm]

Tablo 2. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler (The parameters used in the simulation studies)

Parametre	Sembol	Değer
Örnekleme zamanı	T_s	10 μs
Doğrusal kontrolörlerin oransal kazancı	K_p	5
Doğrusal kontrolörlerin integral kazancı	K_i	20
DA gerilim barası	V_{dc}	325 V
Akıya ilişkin ağırlıklandırma katsayısı	λ_ψ	100
Hıza ilişkin ağırlıklandırma katsayısı	λ_ω	20
Momente ilişkin ağırlıklandırma katsayısı	λ_τ	1
Akıma ilişkin ağırlıklandırma katsayısı	λ_i	1
İzin verilen en fazla akım	$i_{s,max}$	15 A
Sistem gürültüsü kovaryans matrisi	$\mathbf{Q}$	diag($[10^{-2}, 10^{-1}]$)
Ölçüm gürültüsü kovaryans matrisi	$\mathbf{R}$	diag($[1, 1]$)



Şekil 3. Doğrudan MPC yöntemlerine ait kontrol başarımı (Control performance of direct MPC methods)



Şekil 4. Şekil 3'teki çalışma bölgelerinin gösterimi (Presentation of the operating quadrants for Figure 3)

Diğer taraftan, Şekil 5'te sunulan sonuçlarda moment ($\tau_{e,rip}$) ve hız ($n_{m,rip}$) dalgalanmaları Eş. 29'daki ifade kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \chi_{rip} = \frac{\chi_{maks} - \chi_{avg}}{\chi_{anma}} \times 100 \quad (29)$$

Burada, χ moment veya hızı ifade etmektedir. χ_{maks} , χ_{avg} ve χ_{anma} sırasıyla χ 'e ait maksimum değeri, ortalama değeri ve anma değeri

göstermektedir. Diğer bir başarımlar ölçütü olan akım harmoniği ise Eş. 30'daki ifade ile hesaplanmıştır.

$$i_{THD} = 100 \times \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{1,rms}}\right)^2 - 1} \quad (30)$$

Burada, i_{THD} stator akımının a -fazı için toplam harmonik bozulmayı (total harmonic distortion) göstermektedir. I_{rms} ve $I_{1,rms}$ sırasıyla faz

akımının ortalama karesel değerinin karekökünü ve bu değer temel bileşeni ifade etmektedir. Son olarak, ortalama anahtarlama frekansı ($f_{s,avg}$), Eş. 31'deki ifade kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{s,avg} = \frac{N}{n_{sw} \times d} \quad (31)$$

Burada, N , d saniyelik süre boyunca anahtarlama durumlarındaki toplam değişimi ve n_{sw} güç çeviricisindeki güç anahtarlarının sayısını ifade etmektedir. Şekil 5a ve Şekil 5b'de sunulan sonuçlar değerlendirildiğinde;

- PCC'nin tüm başarımlar ölçütlerinde ortalama bir başarımlar sergilediği görülmektedir. Özellikle yüksek hız bölgesinde, diğer yöntemlere kıyasla daha düşük akım harmoniklerine sahiptir.
- PTC yöntemine ait moment ve hız dalgalanmalarının her iki yük altında diğer yöntemlere kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Diğer metrikler açısından ise ortalama bir başarımlar sergilemektedir.
- PDSC moment ve akım harmonikleri bakımından diğer yöntemlere kıyasla daha düşük başarımlar sergilerken, diğer metrikler bakımından ortalama bir başarımlar sergilemektedir.
- Ayrıca, PCC, PTC ve PPC yöntemlerinde dış döngüde kullanılan doğrusal kontrolör katsayılarının, PTC ve PDSC'de kullanılan ağırlıklandırma katsayılarının seçimi, bu yöntemlerin başarımlarını

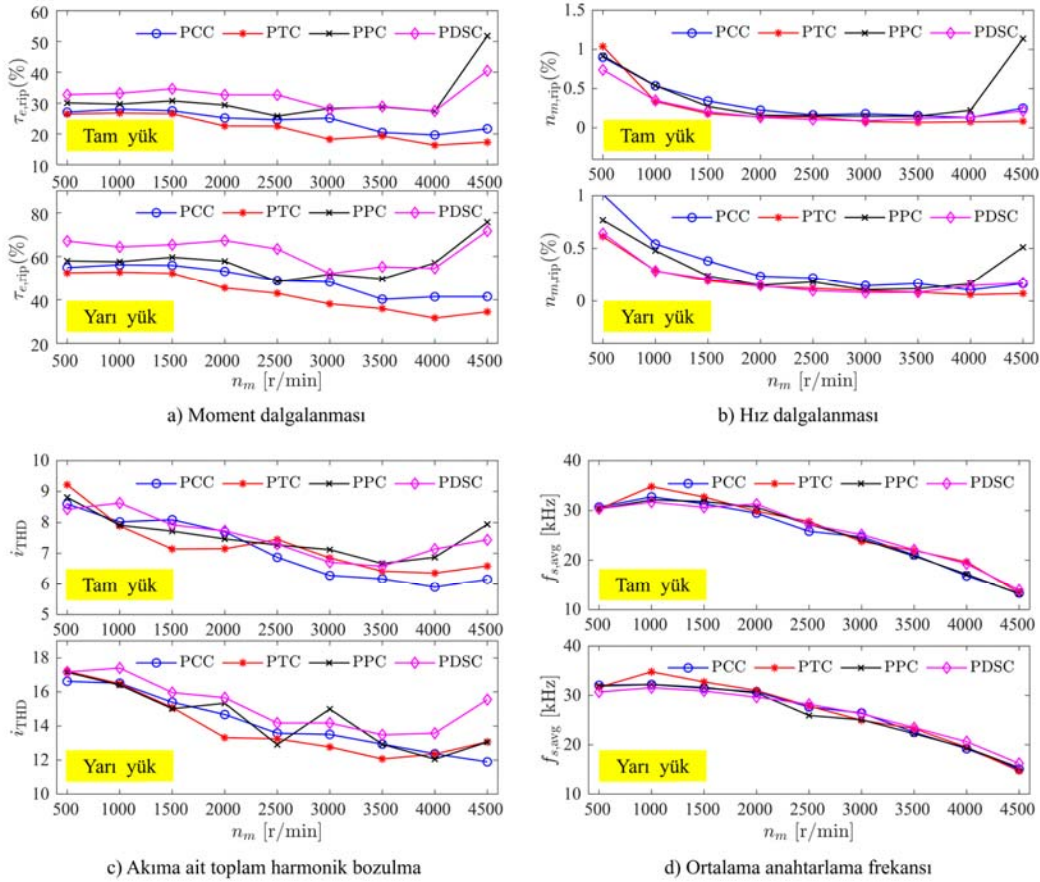
doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, başarımların yanı sıra tasarım karmaşıklığının ve hesap yükünün de yöntem seçimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi önemlidir.

4.2. Doğrudan MPC Yöntemlerinin Tasarım Karmaşası Yönünden Değerlendirilmesi

(Evaluation of Direct MPC Techniques in Terms of Design Complexity)

Ele alınan doğrudan MPC yöntemlerinin kontrol başarımlarının karşılaştırılmasına ek olarak, bu kısımda bu yöntemler diğer önemli bir ölçüt olan tasarım karmaşıklığı açısından değerlendirilecektir. PCC, PTC ve PPC yöntemlerinden farklı olarak, PDSC yönteminin yük bilgisini gerektirmesi ve bu bilginin ölçülmesinin maliyetli olması nedeniyle harici bir kestirici/gözlemleyici kullanılarak elde edilmesi, bu yöntemin olumsuz yönünü oluşturmaktadır. Ancak, bu olumsuz durumun, hız kontrolü için doğrusal kontrol yapısı kullanan diğer yöntemlere göre PDSC'nin hız kontrol başarımlarına olumlu bir etkisi olduğu önceki bölümde gösterilmiştir. Geri kalan yöntemler kendi içerisinde karşılaştırılırsa, Bölüm 3.1'de tanımlanan PCC en temel yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. PTC ve PPC, PCC'deki akım öngörülerini kullanarak, sırasıyla moment/akı ve güç öngörülerini üzerinden hesaplamaları bir adım ötemeye taşımaktadırlar. Bu da, PCC'ye kıyasla bu yöntemlerin tasarım karmaşalarını bir miktar artırmaktadır.

Diğer taraftan, PTC ve PDSC stratejilerinin maliyet fonksiyonunda yer alan ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi en büyük sorunu oluşturmaktadır.



Şekil 5. Doğrudan MPC yöntemlerinin tam ve yarı yüklerde, farklı hızlarda karşılaştırılması
(Comparison of direct MPC methods at full and half loads at different speeds)

Tablo 3. Doğrudan MPC yöntemleri karşılaştırmasının özeti (Summary of the comparison of direct MPC methods)

Yöntem	Kontrol başarımı	Derece
PCC	Geçici anlarda yeterli kontrol başarımı	✓✓
PTC	- Sürekli halde metrikler cinsinden kısmen ortalama başarım - Geçici anlarda yeterli kontrol başarımı - Sürekli halde metrikler cinsinden kısmen ortalama başarım	✓✓
PPC	Geçici anlarda yeterli kontrol başarımı	✓
PDSC	- Sürekli halde metrikler cinsinden PCC ve PTC'ye kıyasla daha düşük başarım - Geçici anlarda yüksek dinamiğe sahip kontrol başarımı - Sürekli halde metrikler cinsinden diğer yöntemlere kıyasla kısmen yeterli bir başarım	✓✓✓
Tasarım karmaşıklığı		
PCC	Ağırlık katsayısı içermez.	✓✓✓
PTC	Ağırlık katsayısı içerir.	✓✓
PPC	Ağırlık katsayısı içermez.	✓✓✓
PDSC	- Ağırlık katsayısı içerir. - Yük momenti kestiricisi/gözlemleyicisi gerektirir.	✓
Hesaplama karmaşıklığı		
PCC	Diğer yöntemlere kıyasla kısmen düşük hesaplama	✓✓✓
PTC	PCC'ye kıyasla kısmen fazla hesaplama	✓✓
PPC	PCC'ye kıyasla kısmen fazla hesaplama	✓✓
PDSC	- Diğer üç yönteme kıyasla kısmen daha fazla hesaplama - Kestirici/gözlemleyiciden kaynaklı ek hesap yükü	✓

Not: ✓ sayısının fazla olması yöntemle ait üstünlüğü göstermektedir.

Bu yöntemlerin en yalın halleri göz önüne alındığında, PTC bir adet, PDSC ise üç adet ağırlık katsayısına sahiptir. Bu katsayılar genellikle deneme-yanılma yöntemi ile ayarlanmaktadır. Sistematik bir yaklaşım ise, [20]'de de önerilen ödünleşim (trade-off) eğrilerini kullanmaktır. Farklı çalışma koşullarında en uygun katsayı değerlerinin değişmesi bu katsayıların çevrimiçi güncellenmesini gerektirmektedir [21]. Bu da ayrı bir tasarım zorluğu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek için, çeşitli çevrimiçi ağırlık katsayısı belirleme ve yok etme yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlerle ilgili kapsamlı bir bilgi [21]'de sunulmaktadır.

Diğer yöntemlerin ağırlık katsayısı içermesi, PCC ve PPC yöntemlerini bir adım öne çıkarsada, ek kontrol hedeflerinin maliyet fonksiyonuna dahil edilmesi durumunda bu iki yöntem de benzer sorunla karşı karşıya kalmaktadır.

4.3. Doğrudan MPC Yöntemlerinin Hesap Yükü Yönünden Değerlendirilmesi

(Evaluation of Direct MPC Techniques in Terms of Design Computational Load)

İlk iki karşılaştırmaya ek olarak, özellikle gerçek-zamanlı çalışmalarda göz önünde bulundurulması gereken diğer önemli bir husus, bu doğrudan MPC yöntemlerinin gerçekleşmesi için gereken hesap yüküdür. Bölüm 3'te matematiksel ifadeleri verilen bu yöntemler ele alındığında, PDSC'nin harici bir yük momenti kestiricisi/gözlemleyicisi içermesi nedeniyle diğer stratejilere kıyasla daha fazla hesap yüküne sahip olduğu görülmektedir. Geri kalan üç yöntem değerlendirildiğinde, PCC, diğer iki stratejiye kıyasla daha düşük hesaplama gerektirdiğinden, hesap yükü PTC ve PPC'den biraz daha düşüktür. PTC ve PPC arasındaki hesaplama farkı Eş. 13 ve Eş. 16'dan kaynaklanmaktadır. Eş. 13'ün daha az hesaplama gerektirmesi PTC'yi hesap yükü bakımından bir adım öne çıkarmaktadır. Tablo 3 bu bölümde gerçekleştirilen karşılaştırmaların genel özeti sunulmaktadır.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, doğrudan MPC yöntemlerinden yaygın olarak kullanılan dört tanesi seçilerek, PMSM kontrolü üzerinden kontrol başarımları, tasarım karmaşaları ve hesaplama yükleri göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada dört-bölge çalışma, ani yük değişimleri ve farklı eğimlere sahip hız girişleri gibi elektrikli motor sürücüsünün karşılaşılabileceği olası çalışma koşulları dikkate alınmıştır. Benzetim çalışmaları, bu dört doğrudan MPC yönteminin sıfır hızdan anma hızına kadar olan bölgede farklı yük koşullarında yeterli kontrol başarımını sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, PDSC'nin ardışık bağlı kontrol yapısını ve hız döngüsündeki doğrusal kontrolden kaynaklanan sorunları ortadan kaldırdığı ve bu nedenle PCC, PTC ve PPC'ye kıyasla daha iyi bir kontrol başarımı sunduğu görülmektedir. Ayrıca, PCC ve PTC'nin PPC'ye kıyasla daha düşük tork ve akım harmonikleri içerdiği de görülmektedir. Diğer taraftan, doğrudan MPC başarımına etki eden ağırlıklandırma katsayılarının PCC ve PPC yöntemlerinde ortadan kaldırılması, bu yöntemlerin tasarımını basitleştirmekte ve düzgün ayarlanmayan ağırlık katsayılarından kaynaklı kontrol başarımı düşüşlerini önlemektedir. Ancak, ek kontrol hedeflerinin gerektiği uygulamalarda bu ağırlıklandırma katsayılarının kullanımı kaçınılmazdır. PDSC'nin harici bir yük kestiricisi/gözlemcisi gerektirmesi hem tasarım karmaşasını hem de hesaplama karmaşasını artırmaktadır. Diğer yöntemler benzer bir mekanizmaya sahip olsalar da, PCC'nin en düşük işlem yüküne sahip olduğu görülmüştür. Özetle, daha yüksek PMSM kontrolü gerektiren uygulamalarda PDSC, maliyet/başarım odaklı uygulamalar için ise PCC bir adım öne çıkmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Zerdali E., Demir R., Speed-sensorless predictive torque controlled induction motor drive with feed-forward control of load torque for electric vehicle applications, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 29 (1), 223-240, 2021.

2. Rodriguez J., Kennel R. M., Espinoza J. R., Trincado M., Silva C. A., Rojas C. A., High-Performance Control Strategies for Electrical Drives: An Experimental Assessment, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (2), 812-820, 2012.
3. Kakosimos P., Abu-Rub H., Predictive Speed Control with Short Prediction Horizon for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, *IEEE Transactions Power Electronics*, 33 (3), 2740-2750, 2018.
4. Wang F., Zhang Z., Mei X., Rodriguez J., Kennel R., Advanced Control Strategies of Induction Machine: Field Oriented Control, Direct Torque Control and Model Predictive Control, *Energies (Basel)*, 11 (1), 120, 2018.
5. Kouro S., Cortes P., Vargas R., Ammann U., Rodriguez J., Model predictive control - A simple and powerful Method to control power converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56 (6), 1826-1838, 2009.
6. Wang F., Li S., Mei X., Xie W., Rodriguez J., Kennel R. M., Model-based predictive direct control strategies for electrical drives: An experimental evaluation of PTC and PCC methods, *IEEE Transactions Industrial Informatics*, 11 (3), 671-681, 2015.
7. Wang J., Yang H., Liu Y., Rodriguez J., Low-Cost Multistep FCS-MPCC for PMSM Drives Using a DC Link Single Current Sensor, *IEEE Transactions Power Electronics*, 37 (9), 11034-11044, 2022.
8. Demir R., Gümüşcü D., Speed-Sensorless model predictive current control of permanent magnet synchronous motors, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 40 (1), 355-363, 2025.
9. Kusuma E., Ravi Esvar K. M., Kumar T. V., A Low Complexity Two Step Predictive Torque and Flux Control Scheme for PMSM Drive, *Electric Power Components and Systems*, 49 (1-2), 146-160, 2021.
10. Choi K., Kim Y., Kim S.-K., Kim K.-S., Computationally Efficient Model Predictive Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Machines Using Numerical Techniques, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 30 (4), 1774-1781, 2022.
11. Zhang J., Ai G., Liang Z., Zhang M., Wang Y., Wang Y., Li Z., Rodriguez J. Zhang Z., Predictive Power Control of Induction Motor Drives, 2021 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), Jinan-China, 524-529, 20-22 November, 2021.
12. Zhang J., Zhang Z., Li Z., Li H., Wang Y., Zhou S., Long T., A Simple and Effective Predictive Power Control for Induction Motor Drives, *IEEE Transactions Power Electronics*, 39 (11), 14898-14908, 2024.
13. Liu M., Chan K. W., Hu J., Xu W., Rodriguez J., Model Predictive Direct Speed Control with Torque Oscillation Reduction for PMSM Drives, *IEEE Transactions Industrial Informatics*, 15 (9), 4944-4956, 2019.
14. Zhang X., He Y., Direct Voltage-Selection Based Model Predictive Direct Speed Control for PMSM Drives Without Weighting Factor, *IEEE Transactions Power Electronics*, 34 (8), 7838-7851, 2019.
15. Gao X., Abdelrahman M., Hackl C. M., Zhang Z., Kennel R., Direct Predictive Speed Control with a Sliding Manifold Term for PMSM Drives, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8 (2), 1258-1267, 2020.
16. Li Z., Wang F., Ke D., Li J., Zhang W., Robust Continuous Model Predictive Speed and Current Control for PMSM With Adaptive Integral Sliding-Mode Approach, *IEEE Transactions Power Electronics*, 36 (12), 14398-14408, 2021.
17. Jiang Y., Xu W., Mu C., Liu Y., Improved deadbeat predictive current control combined sliding mode strategy for PMSM drive system, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67 (1), 251-263, 2018.
18. Zerdali E., Kılıç C., Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Model Öngörülü Güç Kontrolü, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK), İstanbul-Türkiye, 879-883, 14-16 Eylül, 2023.
19. Zerdali E., Yıldız R., A study on improving the state estimation of induction motor, *Electrical Engineering*, 105 (4), 2471-2483, 2023.
20. Cortes P., Kouro S., La Rocca, B., Vargas, R., Rodriguez J., Leon J.I., Vazquez S., Franquelo L.G., Guidelines for weighting factors design in Model Predictive Control of power converters and drives, 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, Churchill, VIC-Australia, 10-13 February, 2009.
21. Zerdali E., Rivera M., Wheeler P., A Review on Weighting Factor Design of Finite Control Set Model Predictive Control Strategies for AC Electric Drives, *IEEE Transactions Power Electronics*, 39 (8), 9967-9981, 2024.