

KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN MODELLEMESİ VE KONTROLÜ

Yazarlar: Ömer Faruk Miran^{1,2}, Meral Bayraktar¹, Erdal Tunçer³

Bağlı olduğunuz kuruluşlar: Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü¹, Bosch Türkiye ve Orta Doğu Genel Müdürlük², İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü³

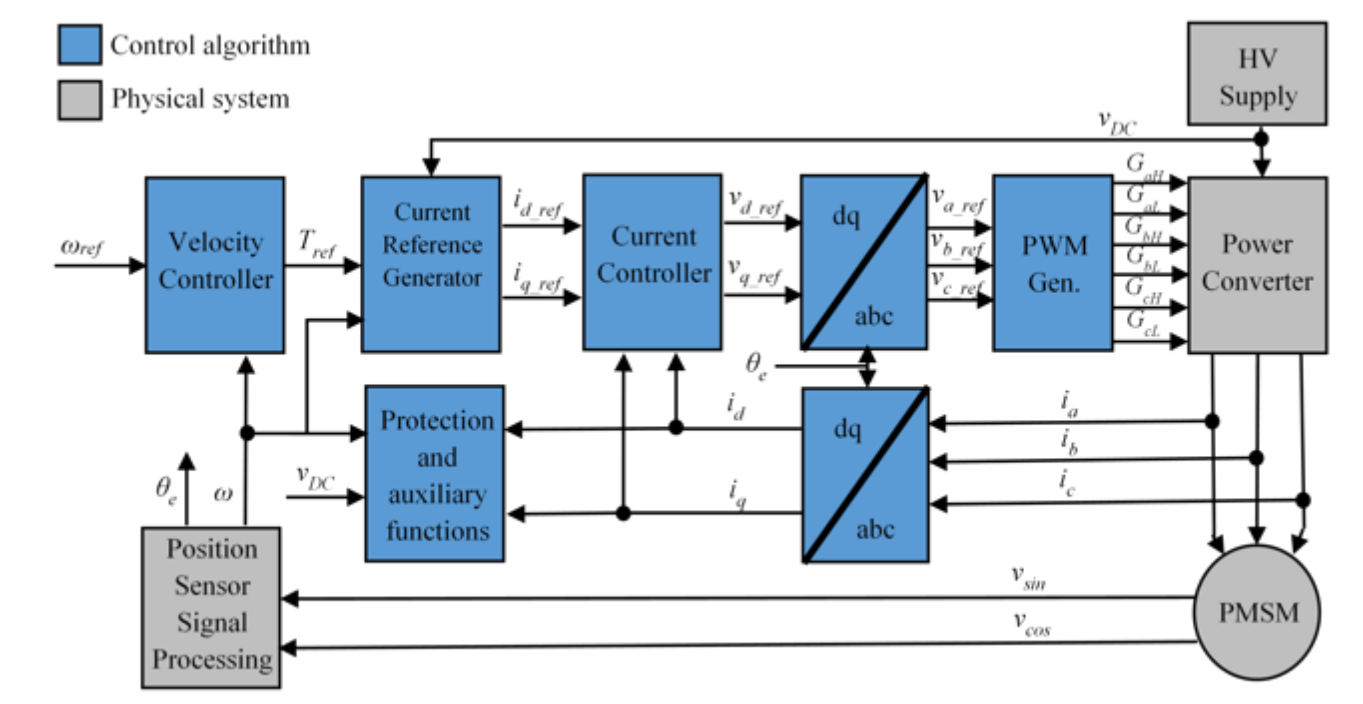
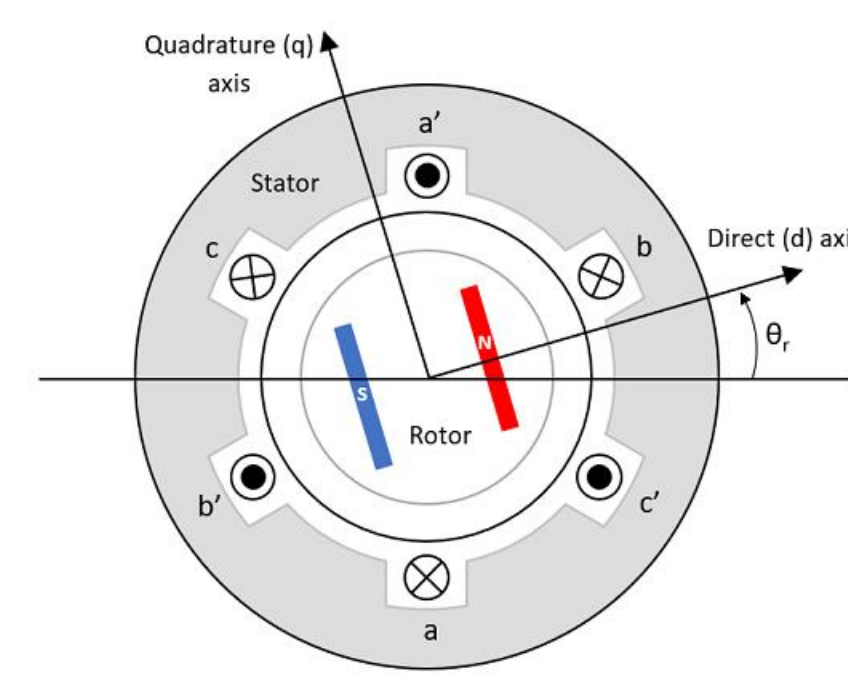
Giriş

Elektrikli araçlar (EV'ler), enerji verimliliği, çevreci ulaşım ve performans beklentilerini karşılamak amacıyla içten yanmalı motorlara alternatif olarak gelişmiştir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (PMSM), yüksek verimlilik, kompakt yapı ve geniş hız aralığı avantajları sayesinde EV uygulamalarında tercih edilmektedir. Tesla Model 3'te kullanılan İçten Mıknatıslı PMSM (IPMSM) yapısı, düşük hızda yüksek tork ve yüksek hızda verimli çalışma imkânı sunmaktadır.

abc – dq dönüşümü (Clarke – Park)	dq – abc dönüşümü (Ters Clarke – Ters Park)	IPMSM Motor Modeli
$i_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right)$ $i_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} (i_b - i_c) \right)$ $i_d = i_\alpha \cos(\theta_e) + i_\beta \sin(\theta_e)$ $i_q = -i_\alpha \sin(\theta_e) + i_\beta \cos(\theta_e)$	$\theta_\alpha = \theta_d \cos(\theta_e) - \theta_q \sin(\theta_e)$ $\theta_\beta = \theta_d \sin(\theta_e) + \theta_q \cos(\theta_e)$ $\theta_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \theta_\alpha$ $\theta_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} \theta_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \theta_\beta \right)$ $\theta_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} \theta_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \theta_\beta \right)$	<p>Elektriksel:</p> $\omega_e = \frac{p}{2} \cdot \omega_m$ $\dot{\theta}_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q$ $\dot{\theta}_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e (L_d i_d + \psi_{pm})$ <p>Elektromanyetik Tork:</p> $T_e = \frac{3}{2} p [\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$ <p>Mekanik:</p> $\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_e - B \cdot \omega_m}{J}$
<p>Akım Denklemleri</p> $\dot{\theta}_{d,ref} = K_{pd} (\dot{i}_{d,ref} - \dot{i}_d) + K_{id} \int (\dot{i}_{d,ref} - \dot{i}_d) dt$ $\dot{\theta}_{q,ref} = K_{pd} (\dot{i}_{q,ref} - \dot{i}_q) + K_{id} \int (\dot{i}_{q,ref} - \dot{i}_q) dt$	<p>PI Kontrol Genel Denklemleri</p> $\dot{\theta}_x = K_p^{(c)} \cdot e_x + K_i^{(c)} \cdot \int e_x dt + feedforward_x$ $i_{q,ref} = K_p^{(c)} \cdot e_\omega + K_i^{(c)} \cdot \int e_\omega dt$ <p>Bu PI yapıları sırasıyla: İç döngü (Current PI): Motorun manyetik kuvvetlerini anlık olarak regüle eder. Dış döngü (Speed PI): Tork ihtiyacına göre iq referansı üretir.</p>	

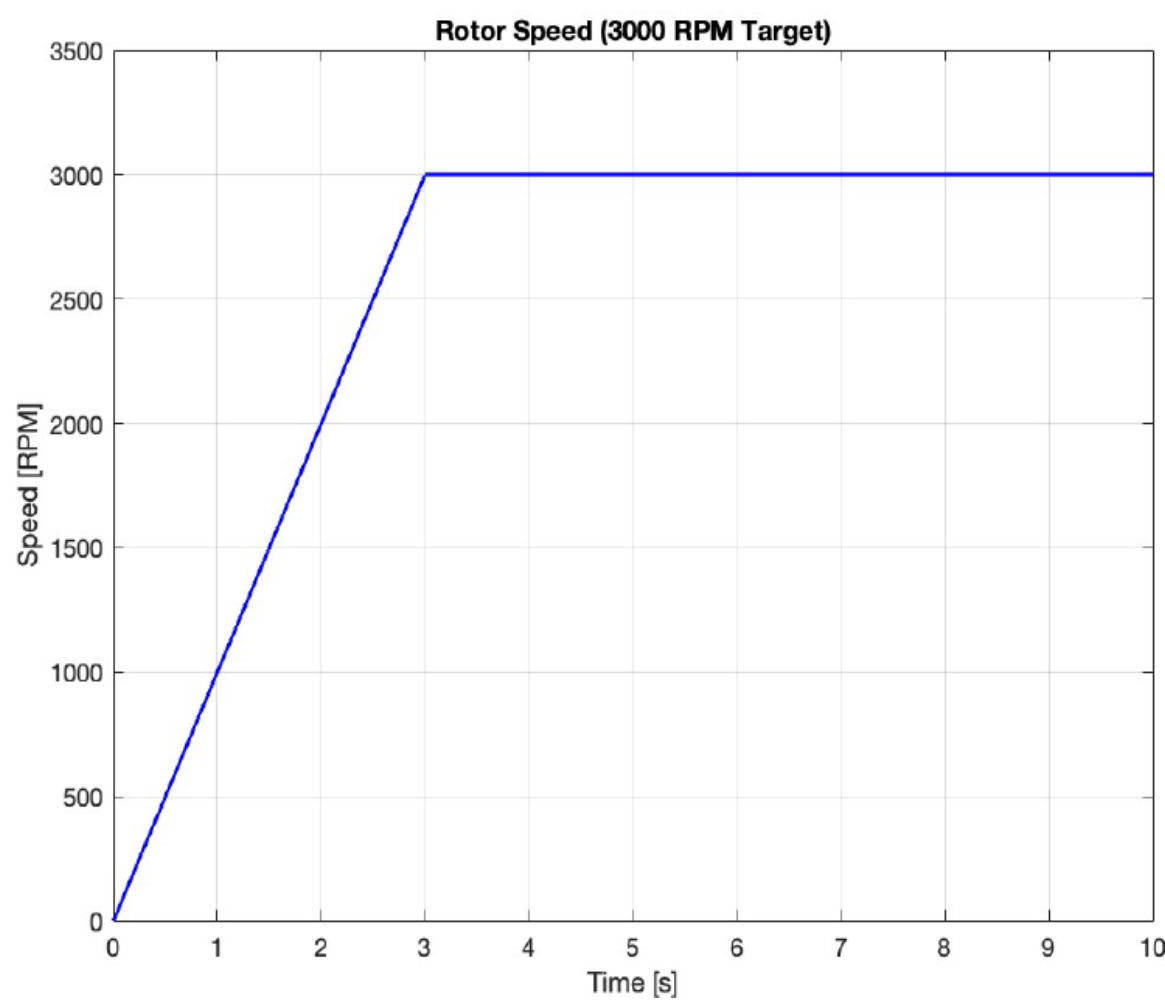
Metodoloji

Çalışmada öncelikle Tesla Model 3 IPMSM motoru için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Motorun d-q referans çerçevesindeki dinamik denklemleri çıkarılmıştır. Alan yönlendirmeli kontrol algoritması uygulanmış, d-ekseni ve q-ekseni akımları PI denetleyiciler ile kontrol edilmiştir. İnverter gerilimleri SVPWM yöntemi ile üretilmiştir. En başta [1] referansından faydalanılarak bire bir aynı parametreler ve kontrolcü değerleri kullanılarak benzer grafikler elde edilmiştir. Sonrasında bu kontrol stratejisi devam ettirilerek Tesla Model 3 parametreleri kullanılarak yeni kontrolcü değerlerine geçiş yapılmıştır. Bunun için de [3] numaralı referans ile karşılaştırma yapılmıştır. Daha robust bir kontrol sağlamak için H Infinity devreye alınacak ve simülasyonlar üzerinden motorun hız ve tork yanıtları incelenecektir.

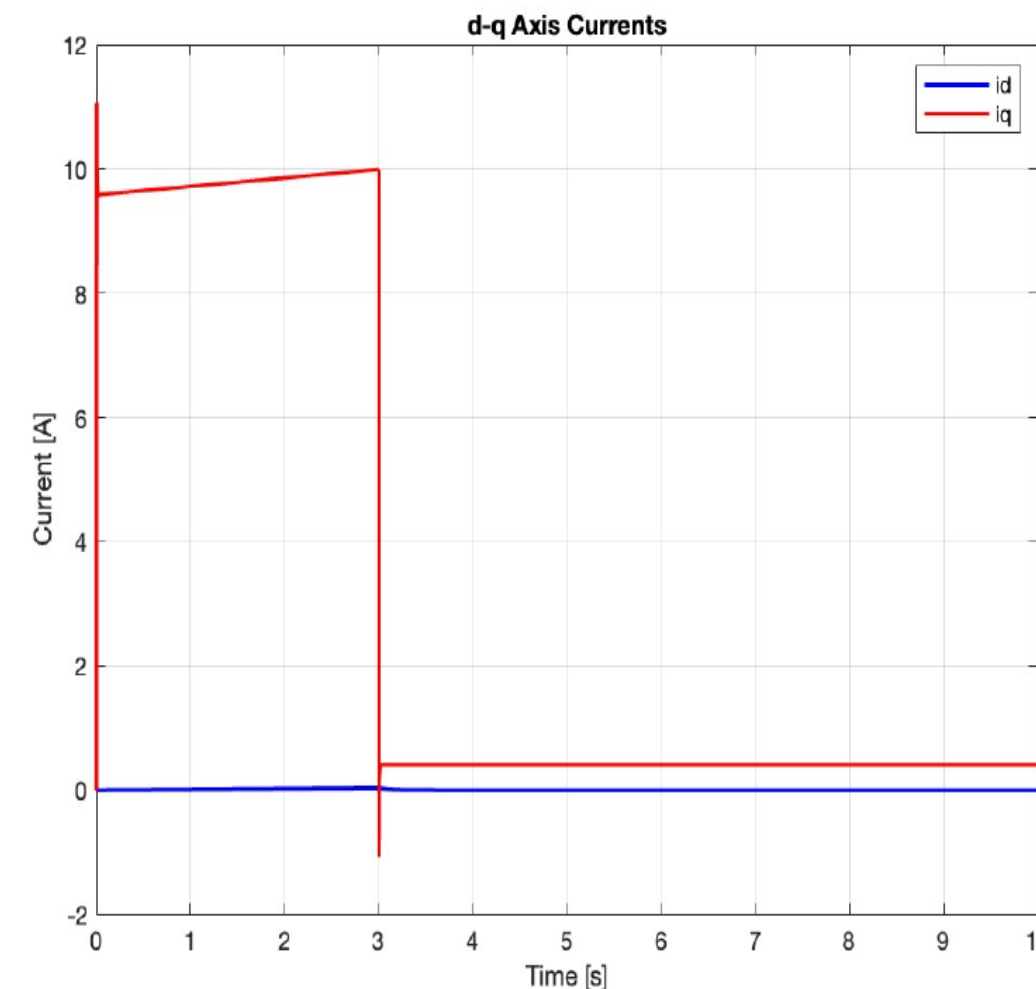


Sonuçlar

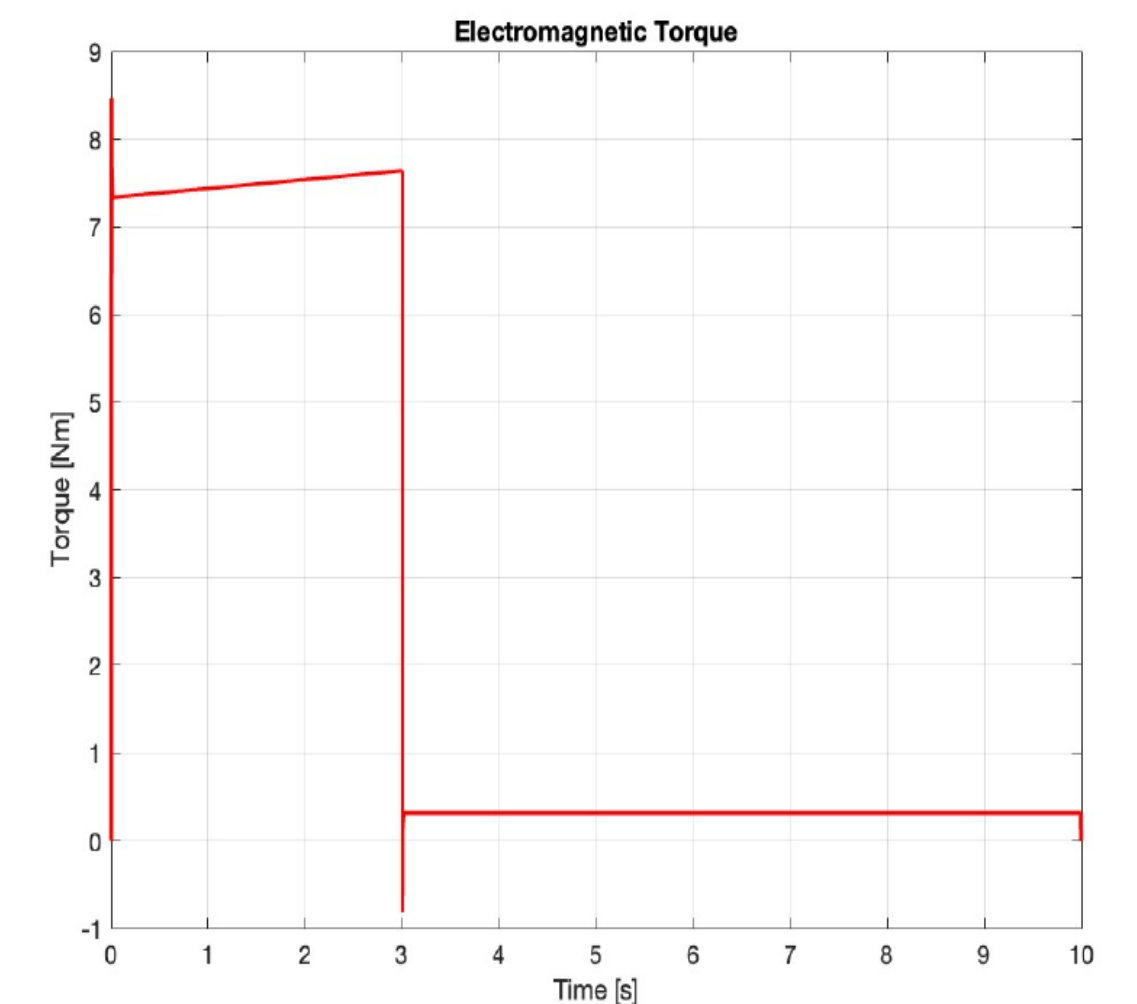
Simülasyon sonuçları motorun 0'dan 3000 rpm'ye yaklaşık 3 saniyede ulaştığını göstermiştir. Hız geçişlerinde aşım ve dalgalanma minimum seviyede kalmıştır. Elektromanyetik tork üretimi istenen referans değere kısa sürede ulaşmıştır. SVPWM algoritması sayesinde DC bara voltajı daha etkin kullanılarak inverter verimliliği artırılmıştır.



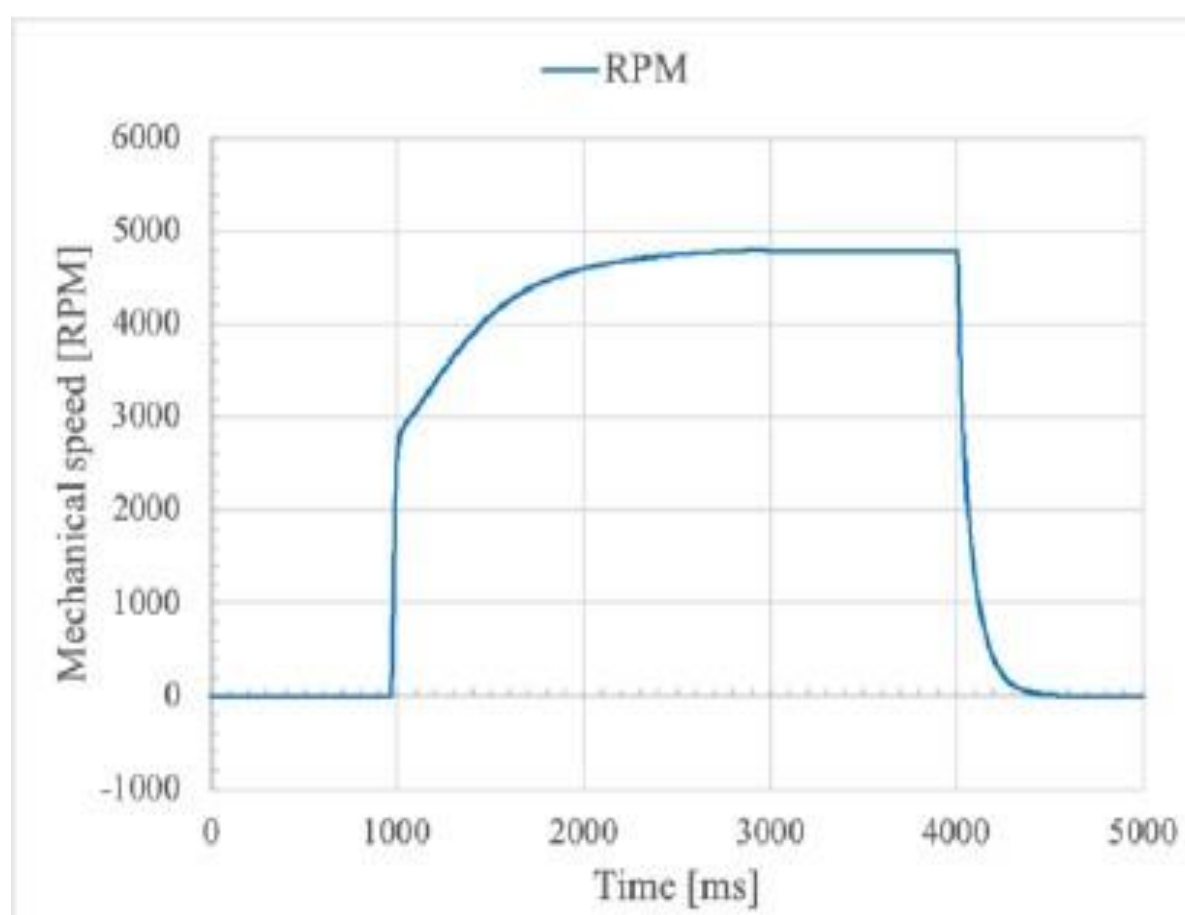
Şekil 1. Rotor Hızı (3000 RPM Hedef)



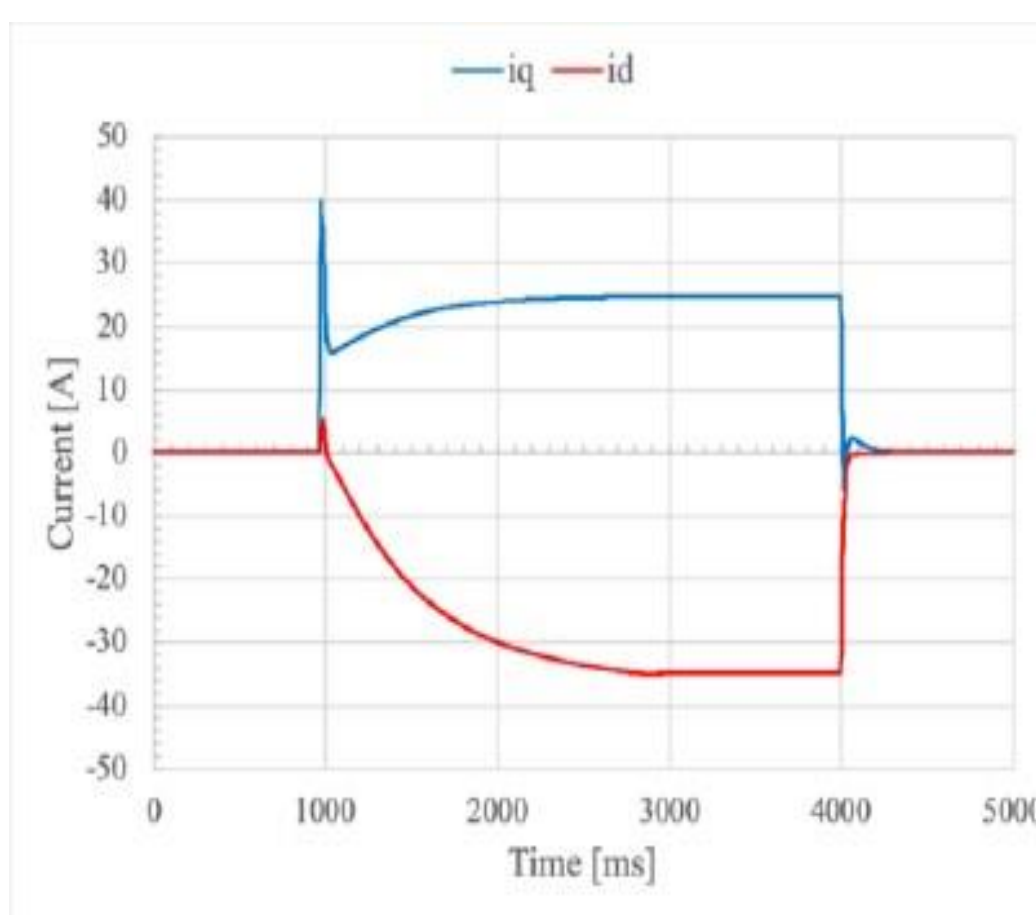
Şekil 2. d-q eksen akımları



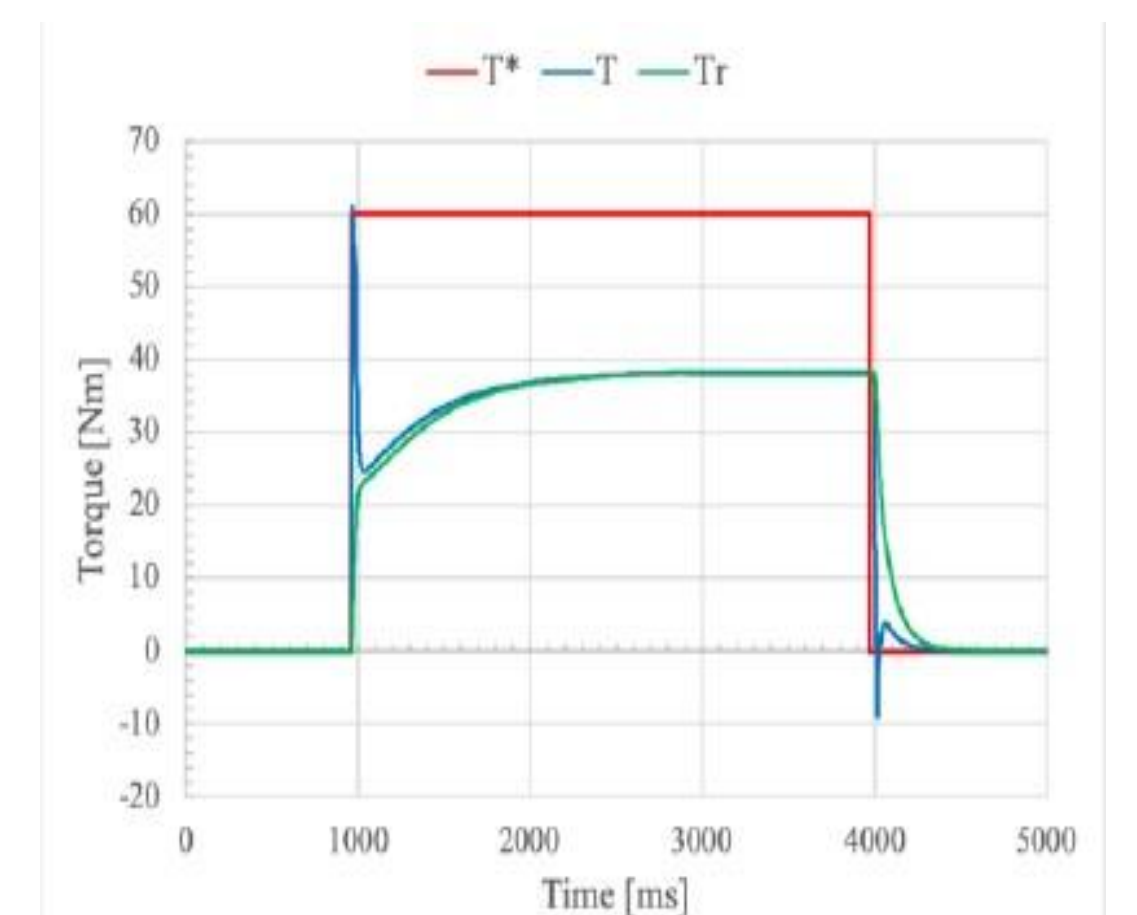
Şekil 3. Elektromanyetik Tork



Şekil 4. Referans Tez Rotor Hızı



Şekil 5. Referans Tez d-q eksen akımları



Şekil 6. Referans Tez Elektromanyetik Tork

Sonuç

Çalışmada Tesla Model 3 IPMSM motorunun FOC ve SVPWM yöntemleriyle kontrolü başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin düşük hızda güçlü tork üretimi kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalarda ileri kontrol teknikleri olan H[∞] kontrol yapısının entegrasyonu ile sistemin dinamik performansının daha da geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Referanslar

- [1] A. Bertelli, Modelling and Design of Control Strategies for Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs), Master's Thesis, Politecnico di Torino, Academic Year 2019/2020.
- [2] R. Acquaviva, High-Speed IPM Motors for Traction Application, Master's Thesis, Politecnico di Torino, 2023.
- [3] R. Rossi, Design of a PMSM Field-Oriented Control Algorithm with Flux-Weakening for Battery Electric Vehicles, Master's Thesis, Politecnico di Torino, 2018–2019.
- [4] MotorXP, "Performance Analysis of the Tesla Model 3 Electric Motor using MotorXP-PM," MotorXP Whitepaper, June 2020.