

BU EK HAKKINDA

Ana rapordan ayrılan küçük ve ikincil konular burada toplanmıştır. Bunlar ısınma ve verim kaybının ana kaynağı değildir; ana çözümler (rotor girdap kaybı, sargı / akım tarafı) uygulandıktan sonra ya da fırsat oldukça ele alınabilir. Ana rapor: [isinma-raporu.pdf](#).

N-4 PWM Dalgalılığı ve Paralel Stator Bağlantısı

Akım dalgalılığı kabaca $\Delta i \propto V_{dc} / (L \cdot f_{pwm})$ ile değişir. İki statorun paralel bağlanması eşdeğer endüktansı tek statorun yarısına, seri bağlantının ise **dörtte birine** indirir. Eksenel akı + açık oluk + 2 mm mertebesinde hava aralığı zaten düşük endüktans demektir. ≥ 16 kHz PWM uygun bir değerdir, ancak dalgalılık L ölçülmeden bilinemez. Yüksek frekanslı dalgalılık alanı alüminyum ve mıknatıs yüzeyinde ($\delta \approx 0,9 / 4,9$ mm) ek girdap akımı yaratır.

N-5 Hava Aralığı Asimetrisi ve Statorlar Arası Dolaşım Akımı

İnceleme raporunda volan merkez kaçıklığı **0,046–0,063 mm** ve rulman yataklarında gevşeklik tespit edilmiştir. Paralel bağlı iki stator farklı hava aralığı görürse EMK'ları farklılaşır ve aralarında **sürücü göstergesinde görünmeyen** bir dolaşım akımı akar; bu akım stator sargısını ısıtır. Ayrıca eksenel çekim kuvvetleri dengelenmez: rotor bir statora yaklaştıkça o taraftaki çekim artar (negatif yay etkisi) ve rulmanlara eksenel yük biner.

N-6 Rulman Sürtünmesi · N-7 Enkoder Ofseti

Rulman ısısı mil üzerinden diske iletilebilir; ancak gövde ve rulman bölgesi sıcak bildirilmediği için ikincil kabul edilmiştir. Enkoder elektriksel açısı kaymışsa sürücü aynı tork için gereksiz I_d akımı basar; yüksüzde I_d ve I_q ayrı kaydedilerek kolayca kontrol edilir.

MEKANİK YAN ETKİ: ISIL GENLEŞME

$Al \approx 23 \cdot 10^{-6} /K$, $NdFeB \approx -1...+5 \cdot 10^{-6} /K$. 30 mm'lik bir cepte 80 K artış $\approx$ **0,05 mm** ek boşluk demektir: yapıştırma hattında gerilme ve mıknatıs gevşemesi riski oluşur.

PERÇİNLİ FR4 KİLİT PLAKALARI

B yüzündeki 2 mm FR4 plakalar mıknatısları eksenel kilitliyor ve Al ağırlara perçinli. Al ($\approx 23 \cdot 10^{-6} /K$) ile FR4'ün düzlem içi genleşmesi ($\approx 12-16 \cdot 10^{-6} /K$) farklı olduğundan 60–100 °C döngülerinde perçinli bağlantı gevşeyebilir; FR4 ayrıca B yüzünde ısı atımını biraz zorlaştırır. Perçin malzemesi (paslanmaz / alüminyum) ve sıklığı periyodik kontrolde izlenmeli.

Ölçüm ve Doküman Notları**ÖLÇÜM NOTU — TEST YAZILIMINDAKİ FİLTRE GEÇİŞ ANLARINDA VERİMİ ŞİŞİRİYOR**

Test yazılımı güçleri $\alpha = 0,10$ katsayılı ($\tau \approx 3,3$ s) alçak geçiren filtreden geçirip verimi bu değerlerden hesaplıyor ve CSV'ye de filtreli değer yazıyor (pc-app/renderer/pages/dashboard.js:513–519). Bu dosyadaki **%74 "tepe verim" t = 49,7 s'de, yavaşlama sırasında** oluşuyor: DC güç birden düşerken filtreli değerler saniyelerce sönüyor. "Motor verimi" sütunu ise ölçüm değil, toplam verimin varsayılan %95 sürücü verimine bölünmesi ($74 / 0,95 = \%77,9$). Diğer testlerde ölçülen %78–83 değerlerinin de ham değerlerle ve kararlı noktada yeniden hesaplanması önerilir; müşteri föyüne aktarılacak verim değeri bu şekilde teyit edilmiş olmalıdır.

ÜRÜN FÖYÜ NOTU

Föyde "20 kW sürekli" ile "150 Nm @ 1500 rpm" (= 23,6 kW) birlikte yazılmış; bu tutarsızlık tasarım hazırlığında ele alınacak.

İkincil Testler

KOD	TEST	NEYİ AYIRT EDER?	YORUM	MALİYET
T4	Serbest yavaşlama (coast-down), uçlar açık	Toplam sürükleme torku	$J \cdot d\omega/dt = T_{kayıp} \cdot J$ CAD'den alınır. T1 ile birlikte manyetik ve mekanik kayıpları ayırır.	DÜŞÜK
T5	Her statorun EMK'sını ayrı ölç (paralel bağlantı açılarak); bağlantı üzerinde pens ampermetre	Hava aralığı asimetrisi · dolaşım akımı	Genlik veya faz farkı %1-2'yi aşıyorsa asimetri var. Bağlantı kapalıyken dolaşım akımı doğrudan ölçülür.	DÜŞÜK
T6	Faz akımı dalga şekli (osiloskop + akım probu) ve sürücünden Id / Iq kaydı	PWM dalgalılığı · enkoder ofseti	Tepe-tepe dalgalılık ölçülür. Yüksüzde belirgin Id varsa ofset veya alan zayıflatma ayarı kontrol edilir.	ORTA
T7	Hava aralığı ölçümü : her iki tarafta 8 noktada sentil ile; rotorun eksenel konumu	Montaj asimetrisi	Taraflar arası fark ve çevresel salınım, N-5'in büyüklüğünü verir.	DÜŞÜK
T8	Endüktans ölçümü (Ld, Lq): seri ve paralel bağlantıda	PWM dalgalılığı hesabı	L ile Δi hesaplanır; çıkış şoku gerekip gerekmediğine karar verilir.	DÜŞÜK

İkincil Çözüm Seçenekleri

KOD	SEÇENEK	HEDEF	BEKLENEN ETKİ	ZORLUK	NOT
Alt	Al ağları tam kalınlıkta (15 mm) FR4/G10 ile değiştirme — bugün B yüzünde yalnız 2 mm FR4 kaplama var; dış bilezik ve iç halka Al, kesintisiz	N-1, B2	Çok yüksek — halka akımı ve ağ yüzeyi girdapları ortadan kalkar	ORTA	Bilezik merkezkaçı çember gerilmesiyle taşımaya devam eder; tork yolu (FR4 dış → iç halka) yeniden tasarlanmalı. Ekip değerlendirmesi: üretimi zor; tek parça G11 kompozit taşıyıcı da bu sınıfta.
R5	İki statoru yarım oluk adımı kaydırma — örn. 90° mekanik = 4,5 oluk = 180° elektriksel	N-1, N-3	Orta — iki taraftaki oluk dalgalanması kısmen birbirini götürür	ORTA	180° elektriksel kayma yalnızca ikinci statorun sargı yönünün ters bağlanmasıyla karşılanır. Etki FEA ile doğrulanmalı.
R6	Çıkış şoku (3 faz) veya statorları seri bağlama	N-4, N-5	T1 / T6 sonucuna göre	ŞOK: DÜŞÜK SERİ: YÜKSEK	Seri bağlantı EMK'yı iki katına çıkarır; 72–120 V'ta devir sınırı oluşur. Şok hızlı ve geri alınabilir bir adımdır.
R7	Göbek ve rulman geçmelerinin revizyonu (İnceleme Raporu B-02, B-04, C-04)	N-5, N-6	Hava aralığı eşitliği; dolaşım akımı azalır	DÜŞÜK	Zaten açık bir aksiyon; ısınma açısından da önceliklidir.
R8	Mıknatıs sınıfını UH / EH'ye yükseltme	Risk	Isınmayı azaltmaz; demanyetizasyon payını artırır	MALİYET	Tek başına çözüm değildir; R1–R3 ile birlikte güvenlik payı olarak düşünülebilir.
R9	Rotor sıcaklık ölçümü (gövdeden IR sensör veya kablolu sensör)	İzleme	Sürücüde koruma ve sınırlama imkanı	ORTA	Ürün seviyesinde, rotor sıcaklığına göre tork sınırlaması için.

ALTERNATİF — TAM FR4 AĞ: DİKKAT EDİLECEKLER

- Al ağlar kalkınca dış bilezik göbekten ayrılır; merkezkaçı **çember gerilmesiyle** taşır, kesintisiz kalmalı.
- Tork yolu** yeniden tasarlanmalı: FR4 dışlardan iç halkaya yapıştırma + pim/vida. Kısa süreli 300 Nm'de dış başına ≈ 115 N çevresel kuvvet.
- Malzeme yüksek Tg'li G11/FR5; yapıştırıcının sıcaklık sınıfı SH mıknatısla (150 °C) uyumlu olmalı.
- Eksenel mıknatıs çekimi ve titreşim için yapısal FEA.