

DENGESİZ GERİLİMLER ALTINDA ASENKRON MOTORLAR.

KISIM 1: PERFORMANS ANALİZİ

¹Merve ŞEN

¹merve.sen@amasya.edu.tr

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Amasya Üniversitesi

²M. Erhan BALCI

²mbalci@balikesir.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Balıkesir Üniversitesi

ÖZET

Güç sistemlerinde; eşit güçlerde olmayan tek fazlı yüklerin beslenmesi, havai hatların transpoze edilmemesi ve güç sistem arızaları gibi sebeplerle farklı seviyelerde gerilim dengesizliği problemi daima var olur. Dengesiz gerilimler asenkron motorlarda mekanik titreşim ve aşırı ısınmaya yol açar. Bunun sonucunda ise asenkron motorlar beklenen ömürlerinden daha kısa sürede işletme dışında kalırlar. Bu çalışmada plaka gücü, gerilimi, verimi ve güç faktörü sırasıyla; 1.5 kW, 380 V, % 82 ve 0.76 olan sincap kafesli, üç fazlı bir asenkron motorun dengesiz gerilimler altında performansı (verim, güç faktörü, üretilen ani momentin salınımı) parametrik olarak analiz edilmiştir. Analizlerde asenkron motorun MATLAB/SIMULINK'te yer alan dinamik modeli kullanılmış ve çeşitli etkin değer seviyeleri ile çeşitli kompleks gerilim dengesizlik faktörü (CVUF) değerlerine sahip çok sayıda dengesiz gerilim durumu dikkate alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gerilim dengesizliği, asenkron motor, dinamik model, verim, güç faktörü, moment.

1. Giriş

Gerilim dengesizliğinin, endüstride yaygın olarak kullanılan asenkron motorların verim, güç faktörü ve ürettiği moment gibi parametreleri üzerinde önemli derecede olumsuz etkilerinin olduğu literatürdeki birçok çalışmada görülmüştür [1]-[8]. Bu olumsuz etkilerin sebebi dengesiz gerilimlerin sahip olduğu pozitif ve negatif sıra bileşenlerinin asenkron motorun rotorunu ters yönlerde döndürecek manyetik akımlar meydana getirmesidir [8]. Bu durum asenkron motorun ürettiği ani momentinde dalgalanmalar dolayısıyla asenkron motorda mekanik titreşimler oluşturur. Ayrıca negatif sıra gerilim bileşeninin meydana getirdiği manyetik akı rotoru normal dönüş yönüne ters yönde döndürmeye çalıştığından dolayı dengesiz gerilimler ile beslenen asenkron motorlar anma çıkış güçlerinde yüklendikleri zaman anma akımlarının üzerinde akımlar çekerler. Bir başka ifadeyle dengesiz gerilimler ile beslenen asenkron motorlar anma çıkış güçlerinde yüklendikleri zaman anma kayıplarının üzerinde kayıplara sahip olurlar ve aşırı ısınırlar. Gerilim dengesizliğine bağlı bu mekanik titreşim ve aşırı ısınma sonucunda ise asenkron motorlar arızalanır veya beklenen ömürlerinden daha kısa sürede işletme dışında kalırlar [6].

Bu çalışmada sincap kafesli üç fazlı bir asenkron motor için MATLAB/SIMULINK'te [10] oluşturulmuş

dinamik model kullanılarak; dengesiz gerilimlerin asenkron motor performansına etkileri parametrik olarak analiz edilmiştir. Analizler sırasında çeşitli etkin değer seviyelerinde ve Komplekse Gerilim Dengesizlik Faktörü (Complex Voltage Unbalance Factor; CVUF) [9] değerlerinde çok sayıda dengesiz test gerilimi dikkate alınmıştır. CVUF indisi gerilim dengesizliğinin ölçülmesi için literatürde önerilen çeşitli indislerden biri olup pozitif ve negatif sıra gerilimlerinin genlikleri (V_+ ve V_-) ile açıları (θ_{V_+} ve θ_{V_-}) cinsinden aşağıda verilen biçimde ifade edilir:

$$CVUF(\%) = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \angle(\theta_{V_+} - \theta_{V_-}) = VUF(\%) \angle\theta_V \quad (1)$$

2. MATLAB/ SIMULINK Model Dosyası

Asenkron motorun dengesiz gerilimler altında dinamik analizinde kullanılacak MATLAB/ SIMULINK dosyası Şekil 1'de verilmiştir. Bu SIMULINK dosyası gerilim kaynakları, asenkron motor bloğu ve ölçüm bloklarından oluşmaktadır. Ölçüm blokları; faz-nötür / hat (faz-faz) gerilimlerinin etkin değerleri ile stator/rotor akımlarının etkin değerlerinin ölçüldüğü RMS blokları, faz-nötür gerilimleri ile stator akımlarının pozitif/ negatif sıra bileşenlerinin ölçüldüğü bloklar ve makinanın ürettiği moment ile çıkış gücünün ortalama değerlerini (M ve P_c) hesaplayan MEAN bloklarından oluşmaktadır. Analizler sırasında etkin değer, ortalama değer ve sıra bileşenlerine ait genlik/ açı değerleri gösterge (DISPLAY)'lerden okunmuştur. Üretilen moment ve açısal hıza ait ani değerler ($M(t)$ ve $\omega(t)$) ise osiloskop (SCOPE)'lardan okunmuştur.

Yukarıda belirtilen ölçümler yardımıyla ayrıca asenkron motorun kaynaktan çektiği aktif güç (P_g) ve görünür güç (S) ile güç faktörü (gf) IEEE std. 1459-2010 [11]'a göre;

$$P_g = 3V_+ I_+ \cos(\theta_+) + 3V_- I_- \cos(\theta_-) \quad (2)$$

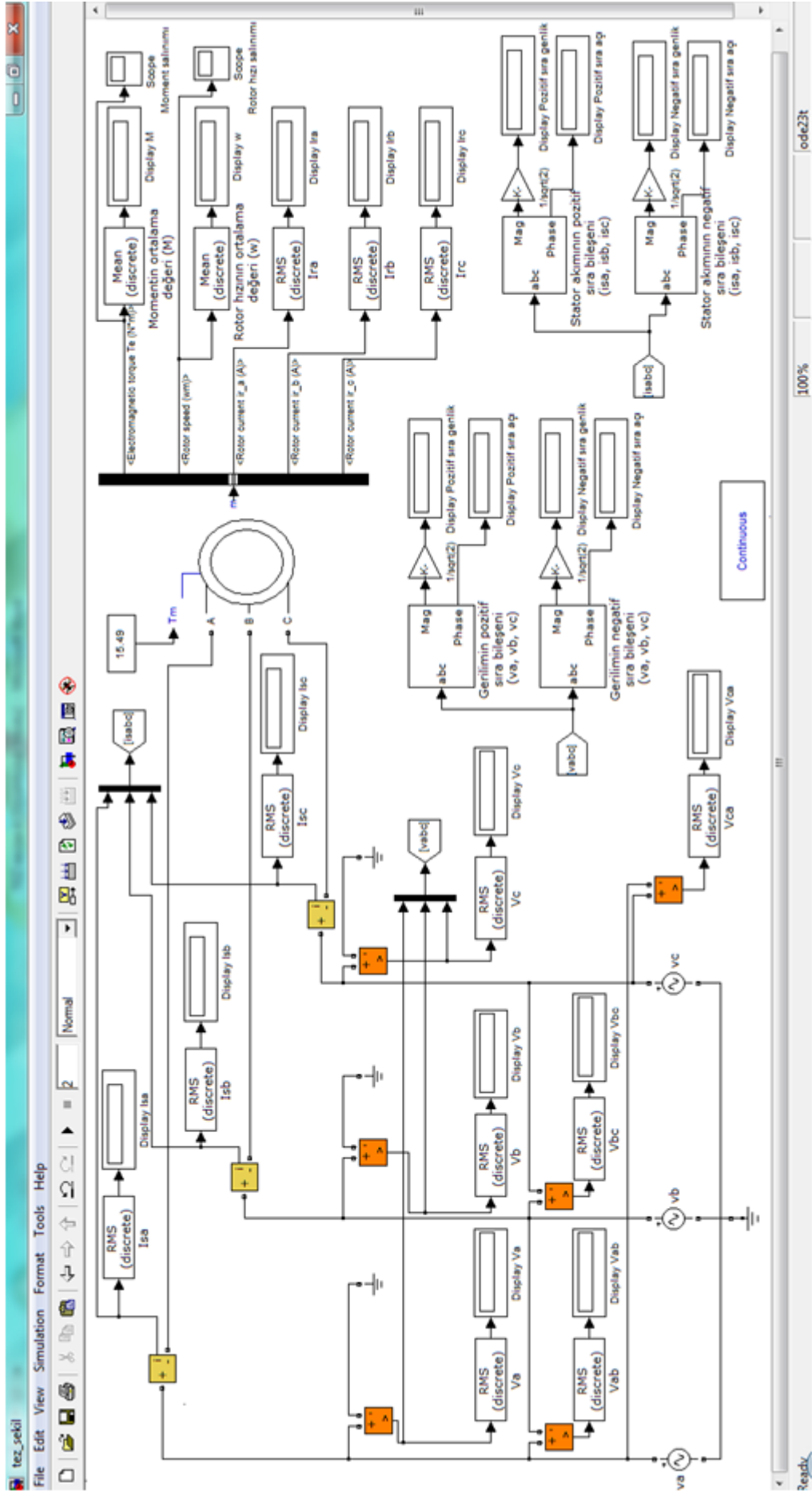
$$S = 3V_e I_e = 3\sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \sqrt{\frac{I_{sa}^2 + I_{sb}^2 + I_{sc}^2}{3}} \quad (3)$$

$$gf = \frac{P_g}{S} \quad (4)$$

ifadeleriyle hesaplanmıştır.

Asenkron makinanın çıkış gücü (P_c) ve verim (η); (5)'de verilen ifadelerden hesaplanmıştır:

$$P_c = \frac{1}{T} \int M(t) \omega(t) dt, \quad \eta(\%) = 100 \frac{P_c}{P_g} \quad (5)$$



Şekil 1 : Asenkron motorun dengesiz gerilimler altında parametrik analizi için kullanılacak MATLAB/SIMULINK dosyası.

a, b ve c fazlarına ait sargılarda ölçülen stator (I_{sa} , I_{sb} , I_{sc}) ve statora indirgenmiş rotor (I'_{ra} , I'_{rb} , I'_{rc}) akımlarının etkin değerleri yardımıyla, her bir faza ait sargı kayıpları (ΔP_{sa} , ΔP_{sb} , ΔP_{sc}) ve toplam sargı kaybı (ΔP_s) (6) ve (7)'de verilen ifadelerle hesaplanmıştır;

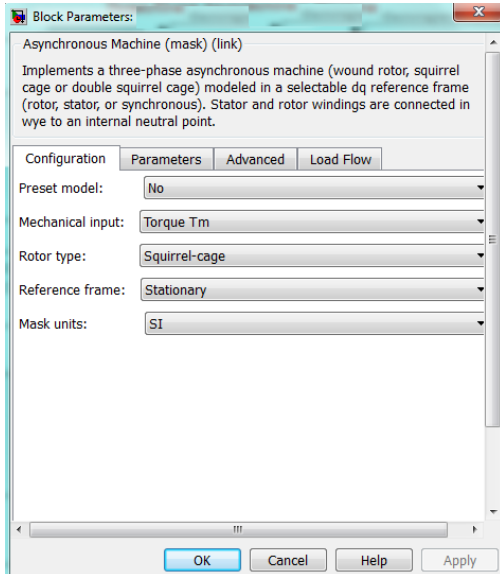
$$\Delta P_{sa} = I_{sa}^2 R_s + (I'_{ra})^2 R'_r, \Delta P_{sb} = I_{sb}^2 R_s + (I'_{rb})^2 R'_r, \quad (6)$$

$$\Delta P_{sc} = I_{sc}^2 R_s + (I'_{rc})^2 R'_r$$

$$\Delta P_s = \Delta P_{sa} + \Delta P_{sb} + \Delta P_{sc} \quad (7)$$

Üretilen ani momentteki salınım; makinanın yol alması tamamlandıktan sonra ürettiği ani momentin en büyük ve en küçük değerleri arasındaki farkın ($\Delta M = M(t)_{maks} - M(t)_{min}$) üretilen momentin ortalama değerine (M) oranı biçiminde ölçülmüştür: $\Delta M/M$.

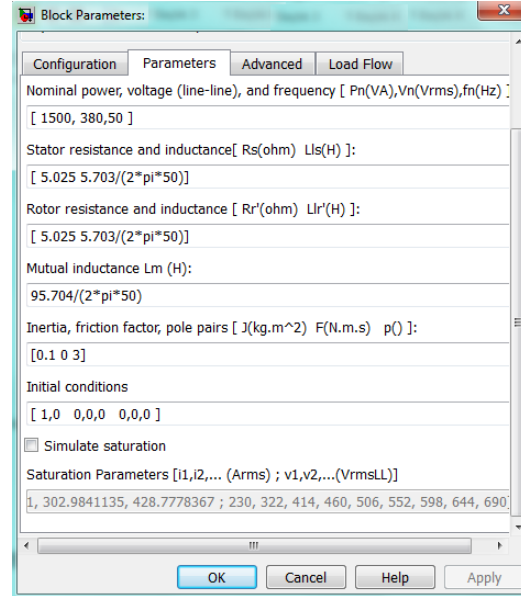
SIMULINK dosyasında yer alan asenkron motor bloğu makinanın dinamik modelini temsil etmekte olup bu bloğun arayüzüne ait konfigürasyon (configuration) ve parametreler (parameters) menüleri Şekil 2 ve 3'de verilmiştir. Konfigürasyon menüsünden asenkron makinanın rotor tipi ve sabit hız/sabit moment çalışma biçimi seçilir. Diğer taraftan asenkron makinanın; anma gerilimi (V_n), anma gücü (P_n) ve anma frekansı (f_n), kutup çifti sayısı (p), stator ve rotor sargı empedans parametreleri (R_s , L_s , R'_r , L'_r) ile çekirdeğin manyetik indüktans değeri (L_m) parametreler menüsünden girilir. Bu menüden ayrıca motorun doyuma eğrisi de girilebilir.



Şekil 2: SIMULINK asenkron motor dinamik modeline ait arayüzün konfigürasyon menüsü.

Şekil 2 ve 3'de yer alan karakteristik ve parametreler, bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde kullanılan asenkron motor modeline aittir. Bu şekillerden analizde dikkate alınan asenkron motorun, stator sargıları yıldız bağlı, sincap kafesli rotorlu olduğu ve anma değerlerinin 1500W, 380V ve 50 Hz olduğu, kutup çifti sayısının ise 3 olduğu görülmektedir. Makinanın doyuma eğrisi ise modelleme sırasında dikkate

alınmamıştır. Son olarak; analizler sırasında asenkron motorun sabit moment çalışma şeklinde çalıştırılması sebebiyle Şekil 2'de mekanik giriş (mechanical input) Torque seçilmiştir.



Şekil 3: SIMULINK asenkron motor dinamik modeline ait arayüzün parametreler menüsü.

3. Analiz

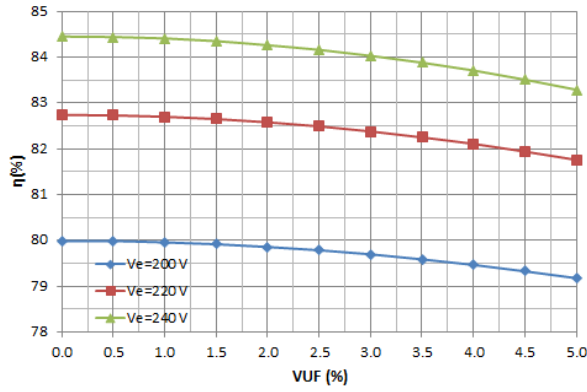
Burada dengesiz gerilimlerin bir önceki bölümde modellenen asenkron motorun performansına (verim, güç faktörü, üretilen ani momentin salınıma) etkisi incelenecektir. Bunun için iki farklı parametrik analiz yapılmıştır:

- Durum 1: CVUF indisinin mutlak değeri ($|CVUF| = VUF = V_-/V_+ \cdot 100$) ile asenkron motorun verimi (η), sargı kayıpları (ΔP_{sa} , ΔP_{sb} ve ΔP_{sc}), güç faktörü (gf) ve üretilen ani momentin salınımı ($\Delta M/M$) arasındaki ilişkinin analizi,
- Durum 2: CVUF indisinin açısı ($A_{\phi}(CVUF) = \theta_v$) ile asenkron motorun yine aynı büyüklükleri arasındaki ilişkinin analizidir.

3.1 Durum 1 için Analiz Sonuçları

Durum 1'de yapılan analizlerde, üç farklı eşdeğer etkin değeri ($V_e = 200, 220, 240V$) ve çeşitli CVUF mutlak değerlerine ($VUF = \%0 - \%5$) sahip test gerilimleri asenkron motora uygulanmıştır. Durum 1'de kullanılan test gerilimlerine ait pozitif ve negatif sıra bileşenleri ve açıları ekler kısmında Tablo 1-3'de verilmiştir. Testlerde asenkron motorun ürettiği momentin ortalama değeri anma moment değerinde (15.49 N.Mt.) sabit tutulmuştur.

Tablo 1- 3'de verilen test gerilimleri için elde edilen VUF- η eğrileri Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4'den üç farklı gerilim seviyesinde de VUF'un artışıyla asenkron motorun veriminin (η) azaldığı görülmektedir.

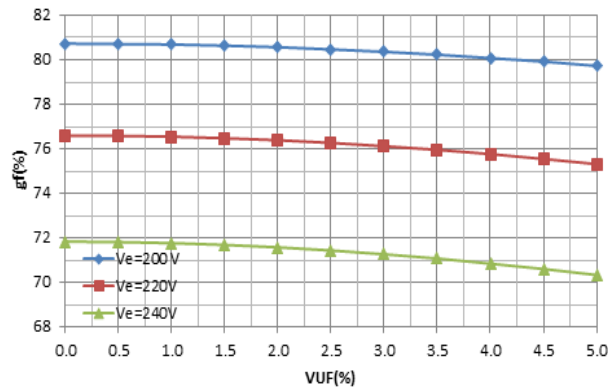


Şekil 4: VUF- η eğrileri.

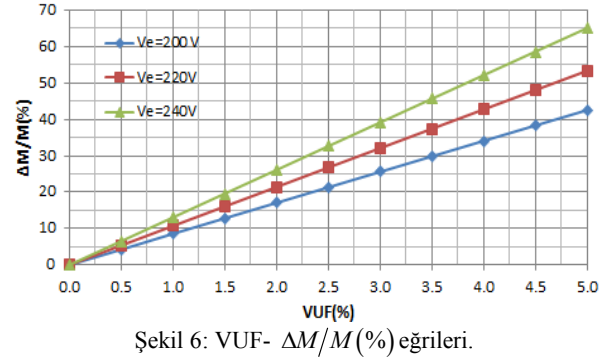
Dengesizliğin asenkron motorun çekirdek kayıplarına etkisinin ihmal edildiği ve testler sırasında asenkron motorun ürettiği momentin ortalama değerinin sabit tutulduğu (diğer bir ifadeyle makinanın çıkış gücünün yaklaşık olarak sabit olduğu) dikkate alındığında, bu sonuç VUF'taki artışın asenkron motorun toplam sarğı kaybını arttırdığını işaret eder. Bununla birlikte aynı VUF değerleri için $V_e=240V$ seviyesinde (aşırı gerilim dengesizlik durumunda) en yüksek verimin elde edildiği, $V_e=200V$ seviyesinde (alçak gerilim dengesizlik durumunda) ise en düşük verimin ölçüldüğü görülmektedir.

Analizlerden elde edilen VUF-gf ve VUF- $\Delta M/M$ eğrileri Şekil 5 ve 6'da verilmiştir. Bu şekiller; güç faktörünün (gf(%)) VUF ve V_e ile ters orantılı olarak değiştiğini, üretilen ani moment salınımının bağlı değerinin ($\Delta M/M$ (%)) ise VUF ve V_e ile doğru orantılı olarak değiştiğini, ayrıca dengeli gerilim durumunda asenkron motorun ürettiği ani momentin salınmadığını göstermektedir.

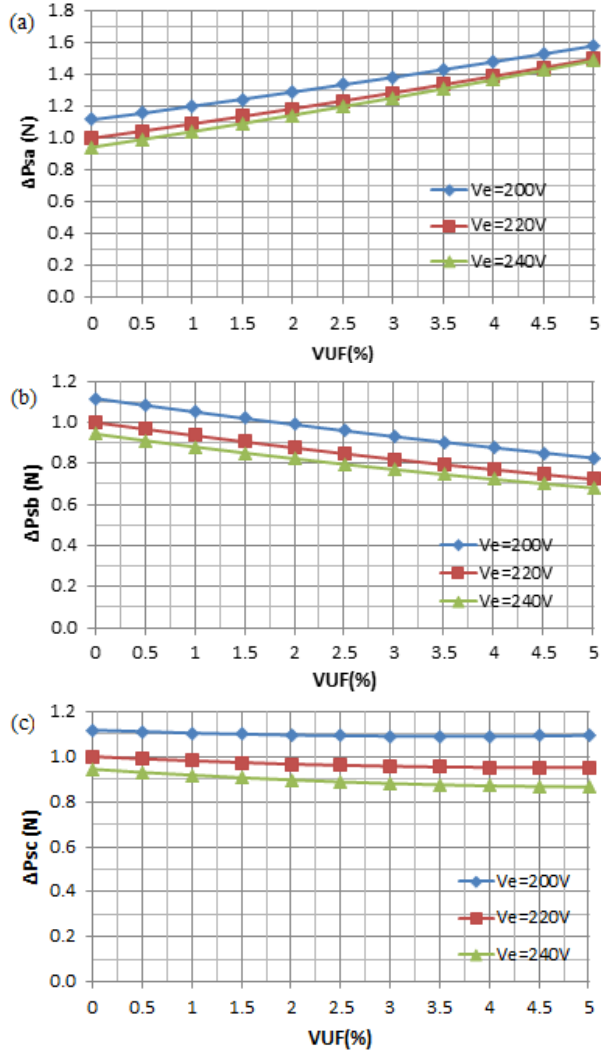
VUF'un a, b ve c faz sarğı kayıplarına etkisini göstermek amacıyla, Şekil 7'de VUF- ΔP_{sa} , VUF- ΔP_{sb} , VUF- ΔP_{sc} eğrileri verilmiştir. Bu şekilde sarğı kayıpları bir faz anma sarğı kaybına bölünerek normalize edilmiştir. Elde edilen eğriler VUF'taki artış; fazlardan birinin (a fazının) sarğı kaybında artışa sebep olmasına rağmen diğer bir fazın (b fazı) sarğı kaybında azalmaya sebep olduğunu üçüncü fazın (c fazı) sarğı kaybına ise önemli derecede etki etmediğini işaret etmektedir.



Şekil 5: VUF- gf eğrileri.



Şekil 6: VUF- $\Delta M/M$ (%) eğrileri.



Şekil 7: (a) VUF- ΔP_{sa} (N), (b) VUF- ΔP_{sb} (N) ve (c) VUF- ΔP_{sc} (N) eğrileri.

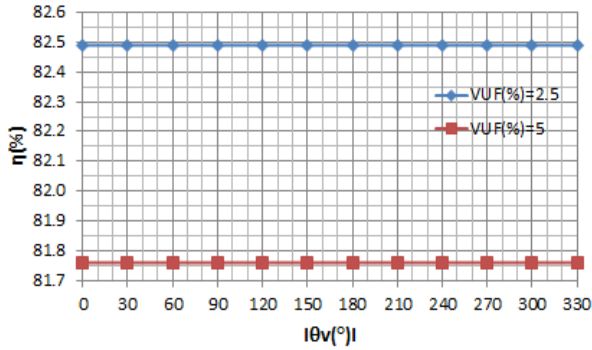
3.2 Durum 2 için Analiz Sonuçları

Durum 2'de yapılan analizlerde, $V_e=220V$ seviyesinde ve iki farklı VUF değerinde ($VUF = \% 2.5$ ve $VUF = \% 5$) fakat farklı CVUF açılarında test gerilimleri asenkron motora uygulanmıştır. Durum 2'de kullanılan test gerilimlerine ait pozitif ve negatif sıra bileşenleri ve açıları ekler kısmında Tablo 4, 5'de verilmiştir. Bu test gerilimleri altında asenkron

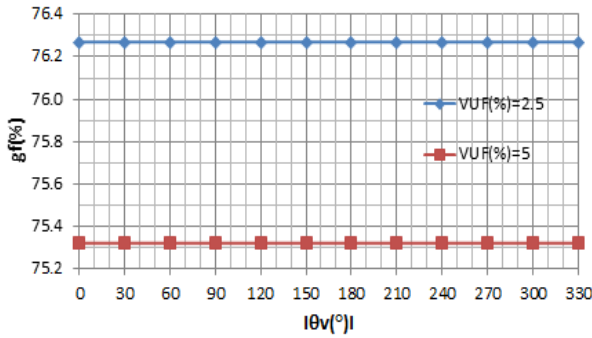
motorun ürettiği ortalama moment anma moment değerinde (15.49 N.Mt.) sabit tutulmuştur.

Tablo 4 ve 5'te verilen test gerilimleri için elde edilen $|\theta_v|-\eta$, $|\theta_v|-\text{gf}$ ve $|\theta_v|-\Delta M/M$ eğrileri sırasıyla Şekil 8, 9 ve 10 'da verilmiştir. Bu şekiller CVUF'un açısındaki (θ_v) değişimden, asenkron motorun verim ($\eta(\%)$), güç faktörü ($\text{gf}(\%)$) ve ürettiği ani moment salınıminin ($\Delta M/M(\%)$) etkilenmediğini göstermektedir.

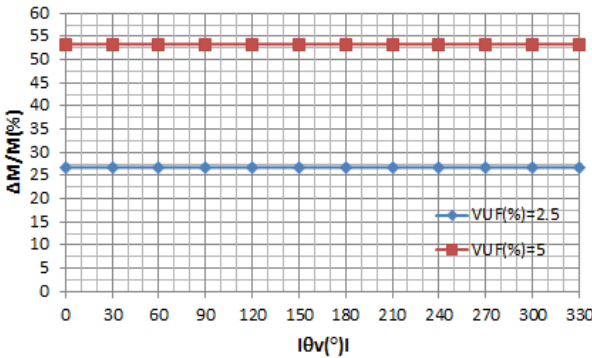
Şekil 11'de ise $|\theta_v|-\Delta P_{sa}$, $|\theta_v|-\Delta P_{sb}$ ve $|\theta_v|-\Delta P_{sc}$ eğrileri sunulmuştur. Bu eğrilerden θ_v 'nin fazlara ait sargı kayıplarında salınımlara sebep olduğu görülmektedir. Ayrıca fazlara ait sargı kayıplarında gözlenen bu salınımlar VUF=% 5 durumunda VUF=% 2.5 durumuna göre daha büyüktür.



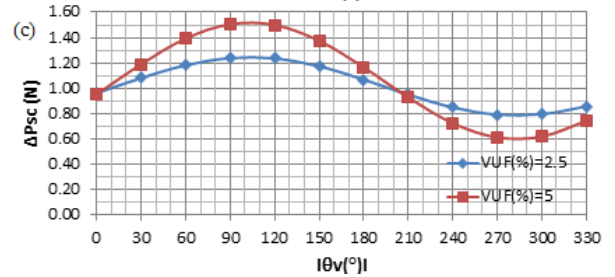
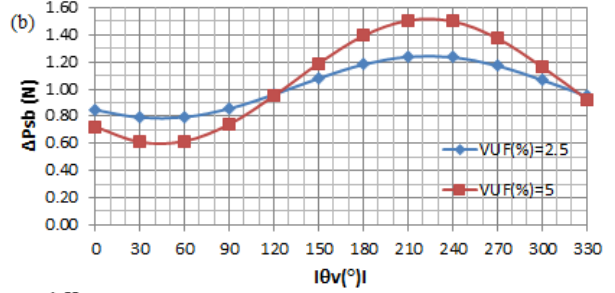
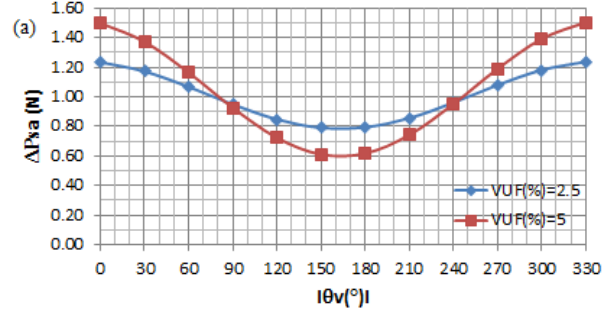
Şekil 8: $|\theta_v| - \eta$ eğrileri.



Şekil 9: $|\theta_v| - \text{gf}$ eğrileri.



Şekil 10: $|\theta_v| - \Delta M/M$ eğrileri.



Şekil 11: (a) $|\theta_v| - \Delta P_{sa}$, (b) $|\theta_v| - \Delta P_{sb}$ ve (c) $|\theta_v| - \Delta P_{sc}$ eğrileri.

4. Sonuç

Bu çalışmada yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilen biçimde özetlenebilir:

- CVUF indisinin mutlak değerinin bir başka deyişle VUF indisinin artışı; asenkron motorun ürettiği ani moment salınıminde artışa, güç faktörü ve veriminde ise azalmaya sebep olur.
- Aynı VUF değeri için gerilim seviyesindeki artış güç faktörü ve üretilen ani momentin salınımi üzerinde olumsuz etki yaparken, verim üzerinde olumlu etki yapmıştır.
- VUF indisinin artışından her bir faza ait sargı kayıpları ayrı ayrı etkilenmiştir. Buna göre VUF'un artışıyla en az bir faza ait sargı kaybı artış gösterirken geriye kalan fazlara ait sargı kayıpları azalabilir veya değişmeyebilir.
- CVUF indisinin açısındaki değişimden asenkron motorun verimi, güç faktörü ve ürettiği ani momentin salınımi etkilenmemiştir.
- CVUF indisinin açısındaki değişimin her bir faza ait sargı kaybının iki sınır değer arasında dalgalanmasına yol açtığı görülmüştür. Bu salınım VUF indisinin artışıyla büyümüştür.

5. Kaynakça

- [1] E. F. Fuchs, M. A. S. Masoum, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Elsevier Academic Press, 2008.
- [2] C. A. Reineri, J. C. Gómez, E. B. Balaguer and M. Morcos, "Experimental study of induction motor performance with unbalanced supply," EPCS, Vol. 34, No. 7, pp. 817-829, 2006.
- [3] Motor and Generators, Part 14.36: Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Polyphase Induction Motors, NEMA Standard MG1-1998 (Revision 3, 2002), 2002.
- [4] IEC Standard 60034-26, Rotating Electrical Machines, Part 26: Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Three-Phase Induction Motors, 2002.
- [5] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112, 1991.
- [6] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, <http://www.epdk.gov.tr> Erişim Tarihi: 15.02.2011.
- [7] Ching-Yin Lee, "Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three phase induction motor," IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 14, No. 2, pp. 202-208, 1999.
- [8] Ching-Yin Lee, Bin-Kwie Chen, Wei-Jen Lee, Yen-Feng Hsu, "Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition", EPSR, Vol. 47, No. 3, pp. 153-163, 1998.
- [9] Y. J. Wang, "Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor," IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 16, No. 3, pp. 270-275, 2001.
- [10] Matlab Programı, www.mathworks.com Erişim Tarihi: 15.10.2012.
- [11] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std. 1459 – 2010.

6. Ekler

Tablo 1: $V_e=200V$ seviyesi için çeşitli VUF değerlerinde test gerilimleri.

VUF	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{V_+} (^\circ)$	$\theta_{V_-} (^\circ)$
0	200	0	0	0
0.5	199.99	1.00	0	0
1	199.99	2.00	0	0
1.5	199.97	3.00	0	0
2	199.96	3.99	0	0
2.5	199.93	4.99	0	0
3	199.91	5.99	0	0
3.5	199.87	6.99	0	0
4	199.84	7.99	0	0
4.5	199.79	8.99	0	0
5	199.75	9.98	0	0

Tablo 2: $V_e=220V$ seviyesi için çeşitli VUF değerlerinde test gerilimleri.

VUF	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{V_+} (^\circ)$	$\theta_{V_-} (^\circ)$
0	220	0	0	0
0.5	219.99	1.10	0	0
1	219.98	2.20	0	0
1.5	219.97	3.30	0	0
2	219.95	4.39	0	0
2.5	219.93	5.49	0	0
3	219.90	6.59	0	0
3.5	219.86	7.69	0	0
4	219.82	8.79	0	0
4.5	219.77	9.89	0	0
5	219.72	10.98	0	0

Tablo 3: $V_e=240V$ seviyesi için çeşitli VUF değerlerinde test gerilimleri.

VUF	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{V_+} (^\circ)$	$\theta_{V_-} (^\circ)$
0	240	0	0	0
0.5	239.99	1.20	0	0
1	239.98	2.40	0	0
1.5	239.97	3.60	0	0
2	239.95	4.79	0	0
2.5	239.92	5.99	0	0
3	239.89	7.19	0	0
3.5	239.85	8.39	0	0
4	239.80	9.59	0	0
4.5	239.75	10.78	0	0
5	239.70	11.98	0	0

Tablo 4: $V_e=220V$ ve $VUF= \% 2.5$ değerleri için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.

VUF	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{V_+} (^\circ)$	$\theta_{V_-} (^\circ)$
2.5	219.93	5.49	0	0
			0	-30
			0	-60
			0	-90
			0	-120
			0	-150
			0	-180
			0	-210
			0	-240
			0	-270
			0	-300
0	-330			

Tablo 5: $V_e=220V$ ve $VUF= \% 5$ değerleri için çeşitli CVUF açılarında test gerilimleri.

VUF	$V_+(V)$	$V_-(V)$	$\theta_{V_+} (^\circ)$	$\theta_{V_-} (^\circ)$
5	219.72	10.98	0	0
			0	-30
			0	-60
			0	-90
			0	-120
			0	-150
			0	-180
			0	-210
			0	-240
			0	-270
			0	-300
0	-330			