Asenkron Motorların Alçak Gerilim Şebekeleri Üzerindeki Dinamik Davranışlarının Analizi ve Etkileri

Mustafa ÇELİK[1], Mehmet KAYA[2], Nurettin ABUT[3]

[1,2,3]Elektrik Mühendisliği
Kocaeli Üniversitesi
[1] mustafa.celik@kocaeli.edu.tr, [2] mehmet.kaya@kocaeli.edu.tr,
[3] abut@kocaeli.edu.tr

Özet

Asenkron motorlar, endüstrideki yaygın kullanım alanları ve enerji verimliliği avantajları nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Ancak, bu motorların alçak gerilim şebekeleri üzerindeki dinamik etkileri, özellikle gerilim düşümleri ve şebeke kararlılığı açısından önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı, asenkron motorların şebeke gerilim düşümleri üzerindeki etkilerini analiz etmek ve bu etkilerin nasıl yönetilebileceğini incelemektir. Çalışmada, ETAP programı kullanılarak motorların devreye alınması sırasında oluşan gerilim düşümleri, şebeke kısa devre gücü, trafo gücü, trafo empedansı ve kablo uzunluğu gibi parametrelerin etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, motorların yüksek kalkış akımları ve düşük güç faktörlerinin şebekede gerilim düşümlerine yol açabileceğini, ancak trafo gücünün artırılması ve empedans değerlerinin optimize edilmesiyle bu düşümlerin minimize edilebileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, motorların şebeke üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için uygun trafo ve kablo seçimleri ile birlikte motor kontrol stratejilerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Abstract

Induction motors are critically important due to their widespread use in industry and energy efficiency advantages. However, the dynamic effects of these motors on low-voltage grids pose significant challenges, particularly in terms of voltage drops and grid stability. The aim of this study is to analyze the effects of induction motors on grid voltage drops and explore how these effects can be mitigated. In this study, the impact of parameters such as voltage drops, grid short-circuit power, transformer capacity, transformer impedance, and cable length during motor start-up is evaluated using ETAP software. The findings indicate that the high starting currents and low power factors of the motors may lead to voltage drops in the grid; however, these drops can be minimized by increasing transformer capacity and optimizing impedance values. Consequently, it is recommended to develop motor control strategies, along with appropriate transformer and cable selections, to mitigate the negative effects of motors on the grid.

1. Giriş

Güç kalitesi, elektrik enerjisinin iletim ve dağıtım sistemlerinde gerilim, frekans ve dalga şekli gibi parametrelerin nominal değerlerine yakın olmasını ifade eder [1]. Yüksek güç kalitesi, elektrikli ekipmanların ve endüstriyel süreçlerin verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Düşük güç kalitesi ise gerilim dalgalanmaları, harmonik bozulmalar ve frekans sapmaları gibi sorunlara yol açarak ekipman ömrünü kısaltır, enerji verimliliğini düşürür ve işletme maliyetlerini artırır [2].
Asenkron motorlar, endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmasıyla birlikte, alçak gerilim şebekeleri üzerinde önemli dinamik etkiler yaratan temel elektrik makineleri arasında yer almaktadır [3-5]. Bu motorlar, enerji verimliliği ve dayanıklılık gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmekte, ancak şebeke üzerindeki etkileri genellikle göz ardı edilmektedir.

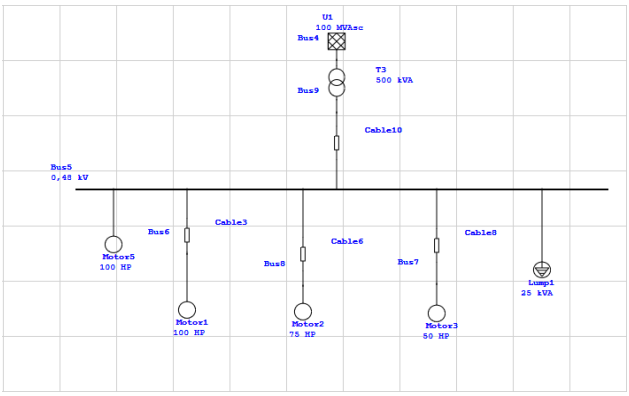
Modern endüstriyel sistemlerde, alçak gerilim şebekeleri ile çalışan asenkron motorlar, güç sistemlerinin performansını doğrudan etkileyen kritik bileşenler haline gelmiştir. Özellikle motorların şebekeye yüklenmesi sırasında meydana gelen dinamik olaylar, güç kalitesi ve enerji verimliliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Asenkron motorların alçak gerilim şebekelerine olan etkileri, özellikle motorların ani başlama akımları ve reaktif güç gereksinimleri nedeniyle, şebeke stabilitesini tehdit eden önemli faktörler arasında yer almaktadır [6,7]. Asenkron makineler rotor yapılarına göre kalkışta nominal akımlarının 4 ila 8 katı kadar akım çekmektedir [8-10]. Bu çalışmada, asenkron motorların şebeke üzerindeki bu dinamik etkileri detaylı bir şekilde incelenerek, güç sistemleri mühendisliğinde karşılaşılan temel sorunlara ışık tutulması amaçlanmaktadır. Literatürde, asenkron motorların alçak gerilim şebekeleri üzerindeki dinamik etkilerini inceleyen birçok çalışma mevcut olmasına rağmen, bu etkilerin analizi ve şebeke performansına etkileri yeterince incelenmemiştir.

Çalışmada, asenkron makinelerin kalkış akımlarının sebep olduğu gerilim düşümlerine karşı şebekede alınacak önlemlere ışık tutulmuş, şebekedeki motorlara direkt yol verme [11], üçgen/yıldız yol verme [12], oto trafo yöntemiyle yol verme [13] ve VFD ile yol verme [14,15] yöntemleriyle yol verilerek kalkış akımları incelenmiştir.

$$V_{sag} = V_n \frac{Z_m}{Z_s + Z_m} \tag{1}$$

Asenkron makineler, kalkış öncesinde yüksek empedansa sahip oldukları için gerilim bölücü modeline (Denklem 1) göre besleme noktasında (barada) belirgin bir gerilim düşümü meydana gelmez [16]. Ancak kalkış anında, rotor hızının sıfır olması ve kaymanın s=1 olması nedeniyle motorun empedansı önemli ölçüde azalır. Bu durum, besleme noktasında gerilim

düşümüne yol açar. Motorun düşük empedansa sahip olması, yüksek kalkış akımı çekmesine neden olur ve bu da şebekede gerilim sarkmaları yaratabilir.



Şekil 1: Şebeke modeli

Şekil 1'de asenkron makinaların alçak gerilim şebeke üzerindeki dinamik etkilerini incelemek için tasarlanan şebeke modeli görülmektedir. 100 MVA gücündeki bir şebekeye 500 kVA'lık bir trafo üzerinden bağlanan 480 V gerilime sahip baraya bağlı motorların kalkış anındaki etkileri incelenmiş ve baradaki gerilim düşümü (Voltage Sag) durumları gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, şebeke kısa devre gücü değişikliği, trafo gücü değişikliği, trafo %Uk değişikliği, kablo boyu değişikliği, şebekeye paralel trafo eklenmesi, baraya bağlı motorlara farklı metotlarda yol verilerek bara gerilim düşümü durumları incelenmiştir. Şebeke parametrelerinde gerçekleştirilen değişikliklerin, baraya bağlı asenkron motorların yol alma süreci üzerindeki etkileri, ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Kısa devre gücü, trafo kapasitesi, trafo empedansı (%Uk), kablo uzunluğu gibi parametrelerde yapılan değişiklikler, motorların şebekeye olan etkilerini belirlemek amacıyla çeşitli simülasyon senaryoları oluşturularak analiz edilmiştir. Ayrıca, şebekeye paralel bir trafo eklenmesi ve motorlara farklı yol verme yöntemlerinin uygulanmasında ortaya çıkan gerilim düşümü durumları gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen simülasyonlar, kısa devre gücündeki artışın şebeke gerilimindeki düşüşü azalttığını, ancak motorların yol alma akımlarındaki artışın trafo ve kablo üzerinde ek yük oluşturduğunu göstermiştir. Trafo gücü ve yüzde Uk (kısa devre gerilimi) değerlerinin optimize edilmesiyle gerilim düşümü minimize edilmiş ve bu sayede motorların daha kararlı bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Kablo uzunluğunun artırılması ise şebeke empedansının yükselmesine ve buna bağlı olarak gerilim düşüşünün artmasına neden olmuştur. Ancak, şebekeye paralel bir trafo eklenmesi bu olumsuz etkiyi önemli ölçüde azaltmıştır.

2. Şebeke Benzetim Modeli

Şekil 1'de gösterilen ve ETAP programında modellenen şebeke modelinde kullanılan şebeke verileri Çizelge 1'de, kullanılan asenkron motor verileri Çizelge 2'de, transformatör verileri Çizelge 3'te ve kablo verileri Çizelge 4'te gösterilmiştir.

Çizelge 1: Şebeke verileri

ID	Type	MVA	kV	Bağlı Bara	Bara Tipi
U1	Şebeke	100	22	Bara 4	Salınım

Çizelge 1'de şebekenin gücü, şebeke nominal gerilimi, bağlı olduğu bara ve bara tipi verilmiştir.

Çizelge 2: Asenkron motor verileri

ID	Tip	Sınıf	Model ID	HP	kV	Yük
Mtr 1	Asenkron	HV-HS-HT	LV100HP2P	100	0.48	Pump
Mtr 2	Asenkron	HV-HS-HT	LV75HP2P	75	0.48	Pump
Mtr 3	Asenkron	HV-HS-HT	LV50HP2P	50	0.48	Pump
Mtr 5	Asenkron	HV-HS-HT	LV100HP2P	100	0.48	Pump

Çizelge 2'de şebeke modelinde kullanılan asenkron motorların sınıfları, model türleri, motor güçleri, nominal gerilimleri ve yük tipleri verilmiştir. Modelde 4 adet asenkron motor kullanılmış olup motorları sırayla devreye alıp, devreden çıkararak bara gerilim düşümleri gözlemlenmiştir.

Çizelge 3: Transformatör verileri

ID	Tip	kVA	Pri. kV	Sec kV	%Z	% X/R
T3	Transformatör	500	22	0.48	4	1.5

Çizelge 3'de şebeke modelinde kullanılan transformatörün gücü, primer ve sekonder nominal gerilimleri ve trafo empedansı verilmiştir. Trafo gücü ve % Uk (yüzde bağıl kısa devre gerilimi) değiştirilerek baralardaki gerilim düşümü durumları gözlemlenmiştir.

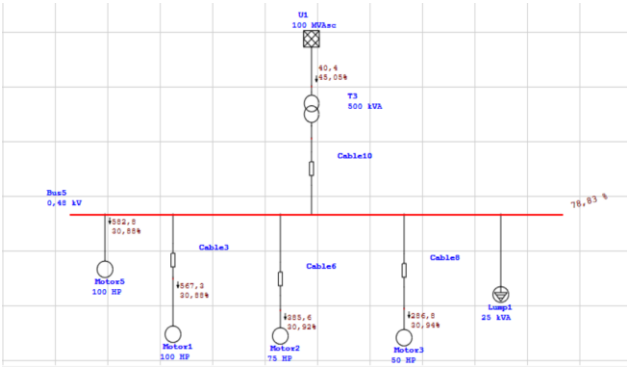
Çizelge 4: Kablo verileri

ID	Sınıf	Uzunluk (m)	Faz & kV	Kesit
Kablo	BS5467 XLPE	50	3 & 1	70 mm²

Çizelge 4'te şebeke modelinde kullanılan kablonun türü, faz sayısı ve nominal gerilimi, kesiti ve baraya olan uzunluğu verilmiştir. Asenkron motorların baraya olan uzaklığı kablo boyu artırılıp azaltılarak değiştirilmiş ve baralardaki gerilim düşümü değerlerinin değişimi gözlemlenmiştir.

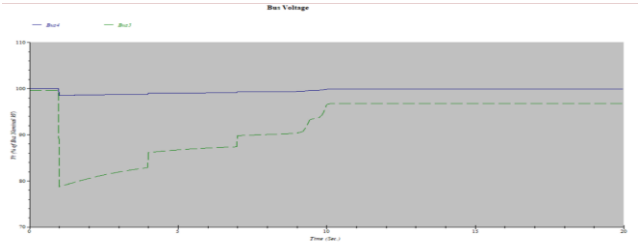
3. Asenkron Motorların Dinamik Kalkış Analizi

Asenkron motorlar, doğrudan şebekeye bağlandıklarında kalkışta nominal akımlarının 4-8 katı kadar akım çekmektedir. Motorların rotor yapılarına göre kalkışta çekilen akım miktarı değişmektedir. Derin oluklu ve yüksek reaktanslı rotor yapısına sahip asenkron motorlar nominal akımlarının 4-5 katı kadar akım çekerken, adi çubuklu rotor yapısına sahip motorlar ise nominal akımının 6 ila 8 kat arasında akım çekmektedir [9].



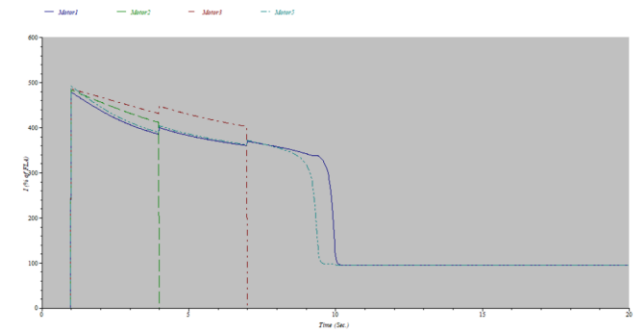
Şekil 2: Motor kalkış anı bara gerilimleri

Şekil 2'de standart parametrelerle belirli bir senaryoya göre devreye alınan asenkron motorların bağlı olduğu baraların gerilim düşümleri gösterilmektedir. Gerçekleştirilen senaryoda, Motor1, Motor2 ve Motor3 bir kablo üzerinden, Motor5 ise doğrudan baraya bağlanmıştır. Simülasyonun 1.saniyesinde tüm motorlar devreye alınacak, 4.saniyede Motor2 ve 7.saniyede Motor3 devreden çıkacaktır. Tüm motorların devreye alındığı durumda 5 numaralı baradaki gerilim düşümünün %78.83 olduğu görülmektedir. IEC 61000-2-4 standardına göre, endüstriyel ve benzeri ortamlar için güç sistemlerinde gerilim varyasyonları nominal gerilimin ±%10'u içinde kalmalıdır [16]. Bu değer, ulusal ve uluslararası standartlarda kabul edilen gerilim düşümü limitlerinin üzerindedir.



Şekil 3: Bara 4 ve Bara 5 Gerilim Seviyeleri

Şekil 3'te, motorların devreye alınıp çıkarıldığı durumlarda bara 4 ve bara 5 üzerindeki gerilim grafikleri gösterilmektedir. Motorların devreye alınması şebeke tarafını etkilememekle birlikte, motorların bağlı olduğu 5 numaralı baranın gerilimi 1. saniyede istenen seviyenin altına düşmüştür. Motor akımlarının nominal değerlere ulaşmasının ardından, bara 5'in gerilimi %96.77 seviyesine gelmiştir.

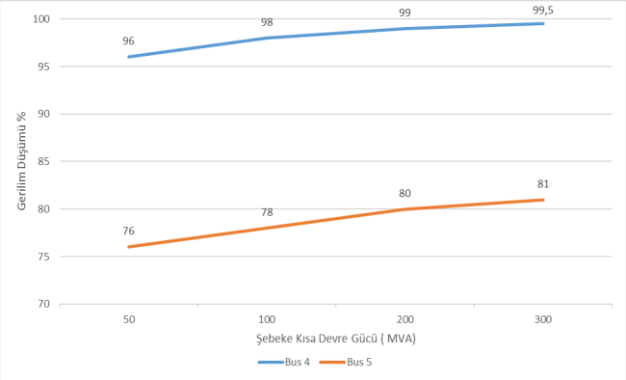


Şekil 4: Motor akımları

Şekil 4'te tüm motorların devreye girdiği andan itibaren çektikleri akım görülmektedir. Tüm motorlar ilk kalkış anında, nominal akımının yaklaşık 5 katı kadar akım çekmektedir.

3.1. Şebeke Kısa Devre Gücü Etkisi

Gerçekleştirilen sistemde motorların devreye girdiği anda bağlı bulundukları baradaki gerilim düşümünün %10 seviyesini aştığı görülmektedir. Bu durumda şebekenin çeşitli parametreleri değiştirilerek 5 numaralı baranın gerilim seviyesindeki değişiklikler gözlemlenmektedir.



Şekil 5: Değişken şebeke kısa devre gücüne göre bara gerilimleri

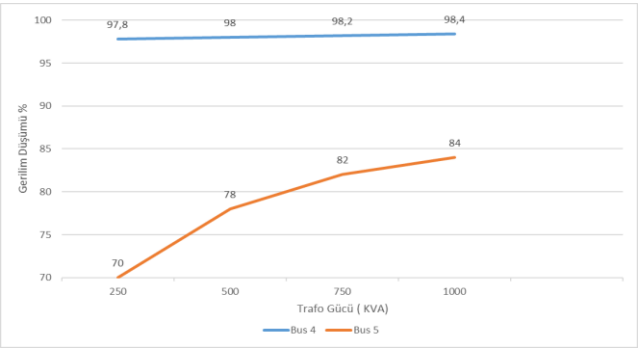
Şebeke kısa devre gücü (S_k) 50 MVA, 100 MVA, 200 MVA ve 300 MVA gücüne göre ayarlanarak motorların devreye girdiği durumda bara 4 ve bara 5 gerilim seviyeleri gözlemlenmiştir.

$$S_k = \frac{V^2}{Z_s} \tag{2}$$

Denklem 2'ye göre şebeke kısa devre gücünün artması, şebeke empedansının (Z_s) düşmesine neden olmaktadır. Yüksek kısa devre gücüne sahip şebeke gerilim düşümlerinden daha az etkilendiği Şekil 5'te görülmektedir. Bu durum motorların ve şebekenin kararlılığını iyileştirir, şebekeye bağlı diğer yüklerin gerilim dalgalanmalarından daha az etkilenmesini sağlar.

3.2. Trafo Gücü Etkisi

Trafo gücü (S_{trafo}) 250 KVA, 500 KVA, 750 KVA ve 1 MVA gücüne göre ayarlanarak motorların devreye girdiği durumda bara 4 ve bara 5 gerilim seviyeleri gözlemlenmiştir.



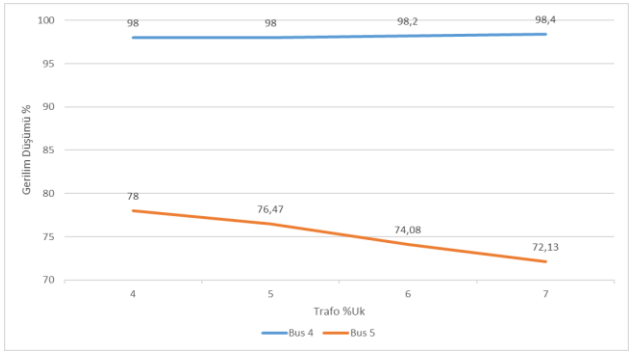
Şekil 6: Değişken trafo gücüne göre bara gerilimleri

$$Z_t = \frac{\%Z}{S_{trafo}} \quad (3)$$

Denklem 3'e göre, trafo gücünün artırılması trafo iç empedansının azalmasına yol açmaktadır. Bu durum, motorların kalkış anında çektikleri yüksek akımın trafoda neden olduğu gerilim düşümünü azaltır. Şekil 6'da da görüldüğü gibi, yüksek trafo gücüne sahip şebekelerin gerilim düşümlerinden daha az etkilendiği gözlemlenmektedir.

3.3. Trafo %Uk Etkisi

Trafo %Uk'sı 4, 5, 6 ve 7 seviyelerine göre ayarlanarak motorların devreye girdiği durumda bara 4 ve bara 5'teki gerilim seviyeleri gözlemlenmiştir.



Şekil 7: Değişken trafo%Uk'sına göre bara gerilimleri

$$Z_t = \frac{\%U_k}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n} \quad (4)$$

Denklem 4'e göre, trafo %Uk'sının artması trafo empedansını artırmaktadır. Trafo %Uk'sı 4, 5, 6 ve 7 olduğunda, motorların bağlı olduğu 5 numaralı baranın gerilim düşümü artmaktadır. Şekil 7'de, trafo %Uk'sı arttıkça gerilim düşümünün arttığı görülmektedir.

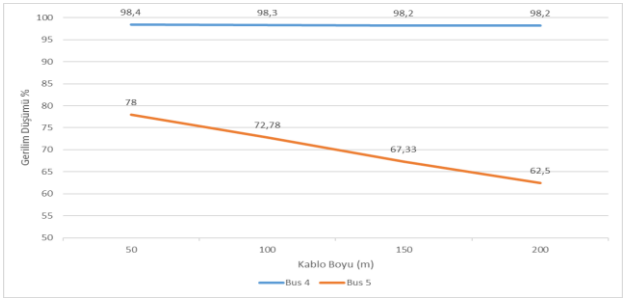
3.4. Kablo Boyu Değişikliği (İletken Uzunluğu Etkisi)

Kablo boyu artırıldığında, kablonun toplam empedansının (direnç ve reaktans) arttığı denklem 5 ve denklem 6'da görülmektedir.

$$R = \rho . \frac{L_{kablo}}{A} \quad (5)$$

$$X = 2\pi f L_{kablo} \quad (6)$$

Kablo empedansı arttığında, asenkron makinenin kalkışta çekeceği akımın neden olduğu gerilim düşümü artacağından bara gerilim düşümlerini artırır. Bu durum, motorun kalkış performansını olumsuz etkiler ve şebeke üzerindeki gerilim dalgalanmalarının artmasına yol açar. Bu duruma çözüm olarak kablo uzunluğu azaltılmalı veya daha yüksek kesitli kablo seçilmelidir.

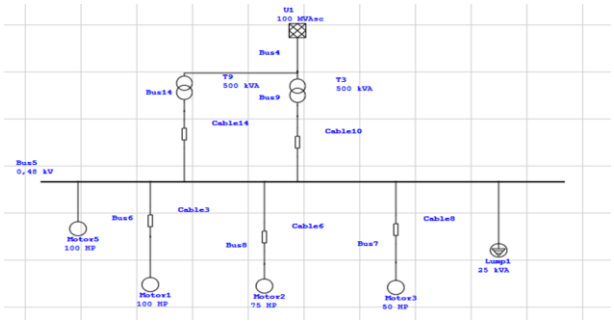


Şekil 8: Değişken kablo boyuna bara gerilimleri

Şekil 8'de, motorları baraya bağlayan kablonun uzunluğu 50 m, 100 m, 150 m ve 200 m olarak değiştirilmiştir. Kablo uzunluğundaki artışın, gerilim düşümünün artmasına neden olduğu gözlemlenmektedir.

3.5. Şebekeye Paralel Trafo Eklenmesi

Şebekeye paralel bir trafo eklenmesi, toplam trafo gücünü artırmakla beraber şebekenin toplam empedansını azaltır. Toplam empedansın azalması, asenkron makinenin kalkışta çekeceği akımın sebep olduğu gerilim düşümünü azaltır.

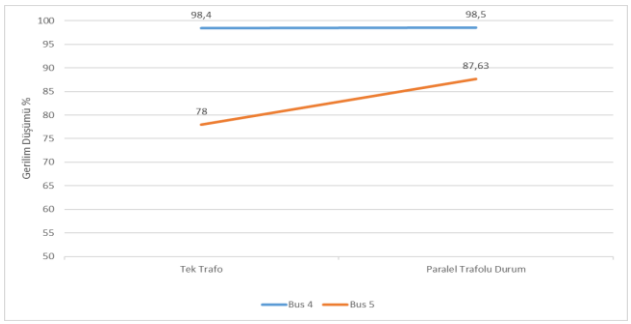


Şekil 9: Paralel trafo eklenmiş hat şeması

Şekil 9'da paralel trafo eklenmiş hat şeması gösterilmektedir.

$$Z_{trafo} = \frac{1}{Z_{t_1}} + \frac{1}{Z_{t_2}} + ... + \frac{1}{Z_{t_n}} \quad (7)$$

Denklem 7'de paralel trafo eklenmesinin trafo empedansını azalttığı dolayısıyla şebekenin toplam empedansın düştüğü görülmektedir.



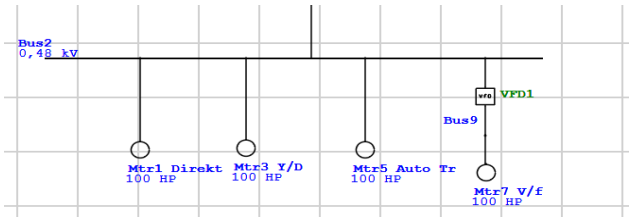
Şekil 10: Paralel trafo durumuna göre bara gerilimleri

Şekil 10'da paralel trafo eklendiği duruma göre bara gerilimleri gösterilmektedir.

Tek trafolu şebekede, asenkron makinelerin kalkış anında neden olduğu gerilim düşümü 5 numaralı bara gerilimini %78'e düşürürken, paralel trafo eklenmiş şebekede 5 numaralı baranın gerilim seviyesinin %87.63 olduğu görülmektedir.

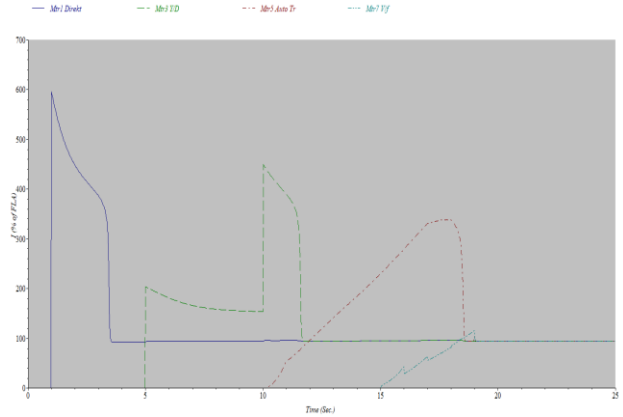
3.6. Baraya Bağlı Motorlara Farklı Metotlarda Yol Verme

Baraya bağlı, 4 farklı yol verme metoduna sahip asenkron motorların hat şeması Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11: Farklı yol verme metotlarına sahip motorların hat şeması

1. motor direkt yol verme, 2. motor üçgen/yıldız yol verme, 3. motor oto trafo yol verme yöntemine ve 4. motor VFD kullanılarak gerilim/frekans hız kontrol yöntemine sahiptir.



Şekil 12: Farklı yol verme metotlarına sahip motorların akım grafikleri

Şekil 12'de doğrudan yol verme yöntemiyle kaldırılan motorun kalkış anında nominal akımının yaklaşık 6 katı kadar akım çektiği görülmektedir. Simülasyonun 5.saniyesinde üçgen / yıldız yol verme yöntemiyle yol verilen motor 5 saniye boyunca yıldız bağlantıda kaldırıldıktan sonra üçgen bağlantıda devam edilmiştir. Motor kalkışta üçgen bağlantıya göre 1/3'ü kadar akım çekmektedir.
10. saniyede Oto trafo ile yol verilen motor, kalkış anından itibaren trafonun şebeke tarafındaki gerilimi kademeli olarak artırarak motora yol verilmektedir. Motor kısa bir süreliğine nominal akımının 3 katı kadar akım çektikten sonra nominal akımına oturmaktadır. Bu yöntem maliyetli olmasından ötürü yüksek güçlü motorlarda daha çok kullanılmaktadır. VFD (Variable Frequency Driver) kullanılarak yol verilen motorda V/f (Gerilim/frekans) hız kontrolü yapılmaktadır. Bara gerilimi 480 V ve şebeke frekansı 50 Hz olduğu için sürücüde %V/f oranı 960 olarak ayarlanmıştır. VFD frekansı kademeli olarak artırılarak ve gerilim/frekans oranı sabit tutularak motora uygulanan gerilim kademeli olarak artırılmıştır. Şekil 12'de görüldüğü gibi VFD kullanılarak yol verilen motor akımı lineere yakın bir grafikle birlikte nominal akımına oturmuştur.

4. Sonuç

Güç kalitesi, modern enerji sistemlerinin güvenilir ve verimli çalışması açısından kritik bir öneme sahiptir. Düşük güç kalitesi, yalnızca teknik ve ekonomik sorunlara yol açmakla kalmayıp, sistem performansını da olumsuz etkileyerek ekipman arızalarına ve enerji maliyetlerinin artmasına neden olur. Asenkron makinelerin kalkış anlarında çektikleri yüksek akımlar, şebeke üzerinde ciddi gerilim düşümlerine yol açar ve bu durum, özellikle bağlı diğer yüklerin performansını olumsuz etkileyerek güç kalitesini düşürür. Bu çalışmada, asenkron makinelerin dinamik kalkış analizi gerçekleştirilmiş ve bu yüksek akımların şebeke üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla çeşitli önlemler incelenmiştir.

Gerilim düşümlerinin azaltılması amacıyla, şebeke kısa devre gücünün ve transformatör gücünün artırılması, transformatör empedansının düşürülmesi, kablo boyunun kısaltılması ve paralel transformatör eklenmesi gibi yöntemler ele alınmıştır. Ayrıca, yumuşak yol vericiler, frekans konvertörleri ve yıldız-üçgen yol verme gibi motor yol verme yöntemleri ile kalkış akımının kontrol edilmesi sağlanmıştır. Çalışmada, alınan önlemler sayesinde baralarda meydana gelen gerilim düşümlerinin etkin bir şekilde azaltıldığı ve buna bağlı olarak güç kalitesinde kayda değer bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Bu iyileştirmeler, enerji sistemlerinin genel verimliliğini artırmanın yanı sıra, ilgili ekipmanların kullanım ömrünü uzatmakta ve işletme maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Bollen, M. H. J. (2000). Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press.

[2] Gönen, T. (2014). Electric Power Distribution Engineering. CRC Press.

[3] Bortoni, E. C., Bernardes Jr, J. V., da Silva, P. V., Faria, V. A., Vieira, P. A., *Evaluation of manufacturers strategies to obtain high-efficient induction motors*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 31, 221-227, 2019.

[4] Kabul A., Ünsal A., *Diagnosis of simultaneous broken rotor bars and static eccentricity faults of induction motors by analyzing stator current and vibration signals*, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (4), 2011-2023, 2021.

[5] S. Sehra, K. K. Gautam And V. Bhuria, "*Performance EvaluatIon Of Three Phase InductIon Motor Based On No Load And Blocked Rotor Test Using Matlab*," Int. J. ScI. EnvIron. Technol., Vol. 1, No. 5, Pp. 541–547, 2012.

[6] Bollen MHJ. The influence of motor reacceleration on voltage sags. IEEE Trans Ind Appl. 1995;31(4):667 - 674.

[7] Gomez JC. *A simple methodology for estimating the effect of voltage sags produced by induction motor starting cycles on sensitiveequipment.* IEEE Industry Applications Conference. 2001;2:1196 - 1199.

[8] Osborn D, Richins R., "Voltage regulation system during large motor starting and operation," 1999 IEEE/-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference. Conference Record (Cat. No.99CH36335), Roanoke, VA, USA, 1999, pp. 109-119.

[9] Abbas M, Majeed MAA, Kassas M, Ahmad F. *Motor Starting Study for a Urea Manufacturing Plant*. International Conference on PowerEngineering, Energy and Electrical Drives, Torremolinos. (Málaga), Spain; May 2011:1 – 6.

[10] IEC 60034-12 (2016). *Rotating Electrical Machines- Part 12: Starting Performance of Single-Speed Three-Phase Cage Induction Motors*. IEC,2016.

[11] Pillary K, Nour M, Yang KH, Harun DND, Haw LK. *Assessment and comparison of conventional motor starters and modern powerelectronic drives for induction motor starting characteristics*. IEEE Symp Ind Elec App. 2009;2:584 – 589.

[12] Zenginobuz G, Cadirci I, Ermis M. *Performance optimization of induction motors during voltage – controlled soft starting*. IEEE TransEnergy Conv. 2004;19(2):278 – 288.

[13] C. Yang, T. Kang, D. Hyun, S. B. Lee, J. Antonino-Daviu, and J. PonsLlinares, "*Reliable detection of induction motor rotor faults under the rotor axial air duct influence*," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 4, pp. 2493–2502, July–Aug. 2014.

[14] Agamloh, E.B. *Power and Efficiency Measurement of Motor-Variable-Frequency Drive Systems.* IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53.1: 766-773< https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2602807 >

[15] Panasetsky, D., et al. *Simplified variable frequency induction-motor drive model for power system stability studies and control*. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49.27: 451-45< https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.774 >

[16] Bollen, Math H. J.. "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions." (1999).

[17] IEC 61000-2-4:2002, "*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*". IEC, 2024.