

# ASENKRON MOTOR YÜK MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Mehmet Ali YALÇIN<sup>1</sup> Kadir ABACI<sup>2</sup>

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Sakarya Üniversitesi, Esentepe Kampüsü, Sakarya

<sup>1</sup>e-posta [yalcin@sakarya.edu.tr](mailto:yalcin@sakarya.edu.tr)

<sup>2</sup>e-posta [kabaci@engineer.com](mailto:kabaci@engineer.com)

*Anahtar sözcükler: Asenkron motor, Yük modellemesi, Model parametreleri*

## ABSTRAC

*Asynchronous motors in the electric power systems tend to turn according to their starting status as a result of any disturbance effect. These behaviours of motor loads might be almost estimated by appropriate load models. This paper is concerned with asynchronous motors modelling correctly in the voltage stability studies. After a disturbance effect, the motor model and dynamic load model results have been compared. By calculating parameters of dynamic load model, motor model response have been tried to get. Also results of both models at low voltage levels have been analysed.*

## 1.GİRİŞ

Gerilim kararlılığı çalışmalarında dinamik yüklerin yaklaşık olarak modellenmesi çok önemlidir [1]. Yüklerin gerilim değişimlerine karşı vereceği cevap geliştirilen çeşitli yük modelleri ile elde edilmeye çalışılmaktadır [2]. Gerilim kararlılığı çalışmaları yapıldığı zaman, yük modelinin seçimi analizin sonucunda önemli bir rol oynayabilir. Yük modelleri genellikle zamana bağlı veya bağlı olmayacak biçimde yani statik ve dinamik olarak sınıflandırılabilir [3]. Statik yük modellerinin sistem davranışını yakalamadaki başarısı dinamik yük modellerine göre daha azdır. Bu nedenle bilhassa asenkron motorlar gibi sabit güç karakteristiği sergileyen yüklerin yaklaşık olarak modellenmesi için dinamik yük modelleri tercih edilmektedir. Dinamik yük modellemesi, gerilim kararsızlığı olayı kadar güç sistemleri dinamik çalışmalarında da çok önemlidir. Eğer yükün tanımlanması yeterince doğru değilse simülasyon sonuçları yükün gerçek davranışına uymayacaktır. Bu da sistemin kararlılık limitinin ilerletilmesini etkileyecektir [4]. Dinamik yük modelleri genel olarak uygun bir zaman sabitini de içeren birinci mertebeden bir diferansiyel denklemle ifade edilmektedir. Bu tür yük modelleri sistemin geçici ve sürekli hal değerlerini yansıtması için iki kısmı da içerir.

Yük karakteristikleri gerilim değişimlerine karşı oldukça duyarlı olduklarından gerilime bağlı olarak tüketilen güç değeri dinamik yük modeli ile aşağıdaki

gibi bir denklemle verilir.  $P$  aktif güç değerini göstermek üzere  $P = z_p P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_t}$  olarak ifade edilebilir. Burada  $z_p$  yük dinamikleri ile ilgili boyutsuz durum değişkeni  $P_0$  ve  $V_0$  başlangıç değerleridir.  $\alpha$  çeşitli yük durumlarına göre değişen üstel bir değerdir ve  $\alpha_t$  (geçici hal),  $\alpha_s$  (sürekli hal) değerleri olmak üzere iki bileşeni mevcuttur. Benzer bir ifade reaktif güç için de yazılabilir. Çoğu güç sistemlerinde yükün büyük bir kısmını oluşturan asenkron motorların döner hareketlerinden dolayı sergiledikleri dinamik davranışlar gerilim kararlılığı çalışmalarında oldukça önemlidir [5]. Asenkron motorlar endüstriyel yüklerin önemli bir bölümünü teşkil eder, bu nedenle onların performanslarının analizi sistem çalışmalarında sık sık yapılır. Bu analizler, herhangi bir bozucu etkinin başlamasından itibaren ya geçici hal ya da sürekli hal performansının incelenmesi şeklindedir [6]. Bu nedenle motorlar için uygulanabilecek elverişli yük modellerinin de bu yapıda olması daha gerçekçi bir sonuç verecektir.

Bu çalışmada gerilim değişimlerine karşı değişik karakteristik yapıya sahip asenkron motorların güç cevapları araştırılmıştır. Bu cevaplar ile genel dinamik yük modelinde aynı gerilim değişimlerine karşı elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dinamik yük modelinde geçici ve sürekli hal parametrik değerleri ( $\alpha_t$ ,  $\alpha_s$ ) ile toparlanma süresi  $T_p$  hesap edilerek bu değerlerle yapılan simülasyon sonuçlarının motor cevabına uygun olup olmadığı gösterilmiştir. Ayrıca düşük gerilim seviyelerinde dinamik yük modelinin yetersizliği gösterilmiştir.

## II. YÜK MODELLERİ

Yük modeli; kısaca bir baraya akan akım ve güç ile bara gerilimi arasındaki ilginin matematiksel ifadesidir [7]. Yük karakteristiklerinin sistem dinamiği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Yanlış yük modellemesi, güç sistemini gerçek bir sistem çökmesine ya da ayrılmasına kadar götürebilmektedir. Doğru yük modellemeleri sistem dinamiği esnasında yükün davranışını yakalamakta ve böylece güç sistemleri kararlılık ve kontrol limitleri

kesin olarak hesaplanıp çalışma ve planlama noktalarında kritik değerler bilinebilmektedir [8]. Birçok çalışmalar göstermiştir ki, yükün tanımlanması analiz sonuçlarında önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle geliştirilen yük modeli çok önemlidir [9].

## II.1 Dinamik Yük Modelleri

Bu modellerle zamanın herhangi bir anında aktif veya reaktif güç, bara gerilimi ve/veya frekansının bu anın bir öncesi ve bir sonrası anlarının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir [6]. Aktif güç ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir. Geçici halde;

$$P = z_p P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_t} \quad (1)$$

Burada  $z_p$  yük dinamiği ile ilgili boyutsuz durum değişkenidir. Sürekli halde modelin gerilim karakteristiği (2) numaralı denklemdeki gibidir.

$$P_s = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_s} \quad (2)$$

Genellikle geçici hal denklemindeki üslü terim  $\alpha_t$  sürekli haldeki  $\alpha_s$  teriminden daha büyük değerlere sahiptir. Bu modelin yük dinamik eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir [10].

$$T_p \dot{z}_p = \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_s} - z_p \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_t} \quad (3)$$

Burada  $T_p$  zaman sabitidir.  $\alpha_t$  ve  $\alpha_s$  değerleri sistemin geçici ve sürekli halde ulaşacağı noktaların bilinmesi açısından önemlidir. Bu değerler bazı logaritmik işlemler yapılarak bulunabilir.  $\alpha_t$  için

$\log \left( \frac{P_t/P_0}{V/V_0} \right)$  yazılabilir.  $\alpha_s$  ve  $T_p$  değerleri en

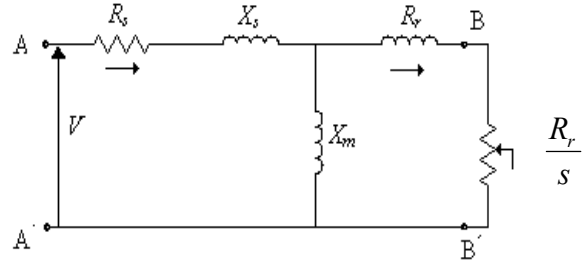
küçük kareler yöntemi uygulanarak da bulunabilir [11]. Ancak farklı gerilim seviyeleri için bu değerler ayrı ayrı araştırılmalıdır.

## II.2. Asenkron motor için dinamik model

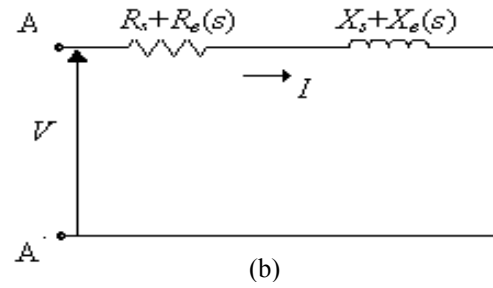
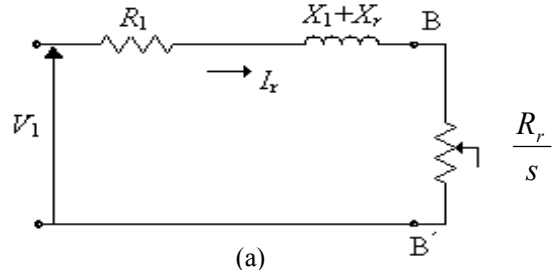
Asenkron motorlar aniden değişen gerilimlerde birkaç saniyede mekanik ataletlerine uymak için çabuk bir şekilde cevap verirler. Kaynak tarafında ani bir değişim derhal asenkron motoru empedans bir yük gibi harekete geçirir. Bu eşdeğer devre denklemlerinden açık bir şekilde görülür. Kayma motorun eylemsizliği yüzünden aniden değişmez. Gerilimin yavaş azalması ve diğer ekipmanların yavaş dinamikleri yüzünden bu sabit aktif güç yüküne iyi bir örnektir [12]. Simülasyon programlarının sayısal performanslarının artmasıyla dinamik motor modelleri statik sabit güç yükü modeline nazaran daha iyi sonuçlar vermektedir. Farklı karakteristikleri nedeniyle hem küçük hem de büyük motorlar için model yapmak arzu edilebilir Motorlar büyük bozucu etki sonrası yeniden toparlanma zorluğu nedeniyle önemli baralarda ki gerilimin değişmesini etkiler. Frekans salınımlarını da inceleyen çalışmalarda motor ataletinin etkisi önemlidir. Rotor akısı geçici olayları bu salınımlara tesir eder [13].

## Sürekli Hal Eşdeğer Devresi

Bir üç fazlı asenkron makinenin sabit rotor rezistansı ile gösterilen eşdeğer devresi Şekil -1' de verilmiştir.



Şekil-1. Asenkron motorun sürekli hal eşdeğer devresi



Şekil-2. Asenkron motorun (a) BB' den görülen Thevenin eşdeğeri (b) AA' den görülen Thevenin eşdeğeri

Motorun bilinen kayma denklemi aşağıdaki gibidir.

$$s = \frac{\omega_0 - \dot{\theta}_r}{\omega_0} \quad (4)$$

Burada  $\omega_0$  nominal açısal frekans ve  $\dot{\theta}_r$  birim zamanda rotor hızıdır. Şekil-1'de  $X_s$ ,  $X_r$  sırasıyla stator ve rotor kaçak reaktansı,  $X_m$  magnetik reaktanstır. Mekanik sürekli hal gerekli değildir. Böylece motor kayması değişebilir. Şekil-1'den türetilen eşdeğer devreler Şekil-2a,b'de gösterilir. Şekil-2a'da BB' tarafından bakıldığında devrenin Thevenin eşdeğer devre parametreleri aşağıdaki gibidir.

$$V_1 = \frac{X_m V}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_m)^2}} \quad (5)$$

$$R_1 + jX_1 = \frac{jX_m (R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (6)$$

Motor bir  $Z$  empedansı üzerinden bir gerilim kaynağına bağlandığında, dış empedans ( $Z$ ) statora ( $R_s + jX_s$ ) eklenebilir. Burada  $V$  kaynak gerilimidir. Şekil-2b stator terminalinden bakıldığında görülen eşdeğer devreyi gösterir. Motorun stator akımı

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{(R_s + R_e) + j(X_s + X_e)} \quad (7)$$

### Asenkron Motor Moment - Güç- Hız İlişkisi

Bu ilişki motorun durma karakteristiği ile açıklanır. Motorların durması ataletine ve dinamik değişimlerine bağlıdır. Motor elektriksel momenti gerilimin karesi ile orantılıdır. Bu eşdeğer devreden görülebilir. (bkz. Şekil-1.) Şönt magnetik direnç ihmal edilirse elektriksel moment hava aralığı gücüdür (rotor sargı kayıpları çok az moment akımının karesi ile orantılı olduğundan gerilimin karesi ile de orantılıdır). Mekanik moment elektriksel momenti aşabildiğinde durma meydana gelir. Kompresör yükler için (klimalar ve soğutucular) bir gerilim azalmasını takiben yeniden start veya yeniden toparlanma kısa bir servis dışı kalmayı gerektirdiğinden pek başarılı değildir [12]. Statordan rotora aktarılan aktif güç eşdeğer devreden hesaplanarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_g = I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (8)$$

yukarıdaki denklemden rotor kayıpları çıkarılacak olursa

$$P_e = I_r^2 \frac{R_r}{s} (1-s) \quad (9)$$

gibi olur. Aynı güç rotor hızı ile elektromagnetik momentin ( $T_e$ ) çarpımıyla da bulunabilir.

$$P_e = T_e \frac{\dot{\theta}}{\omega_0} = T_e (1-s) \quad (10)$$

(8) ve (9) eşitlikleri karşılaştırılırsa elektromagnetik momentin ifadesi

$$T_e = I_r^2 \frac{R_r}{s} = P_g \quad (11)$$

Şekil-2a'da verilen eşdeğer devreden  $I_r$  çözümlenirse motor tarafından geliştirilen moment, kayma ve  $V_1$  geriliminin bir fonksiyonu olarak elde edilebilir

$$T_e(V_1, s) = \frac{V_1^2 \frac{R_r}{s}}{(R_1 + \frac{R_r}{s})^2 + (X_1 + X_r)^2} \quad (12)$$

terminal gerilimi ve kaymanın fonksiyonu olarak elektromagnetik moment aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_e(V, s) = \frac{V^2 X_m^2 \frac{R_r}{s}}{[(R_1 + \frac{R_r}{s})^2 + (X_1 + X_r)^2][R_s^2 + (X_s + X_m)^2]} \quad (...13)$$

Asenkron motorlar için uygulanabilir birinci mertebeden diferansiyel denklem

$$2H \dot{s} = T_m(s) - T_e(V, s) \quad (14)$$

Burada  $H$  eylemsizlik sabiti [sn]  $T_m$  mekanik kayıpları da içeren mekanik momenttir ve sabit kabul edilir.

### III. SİMULASYON ÇALIŞMALARI

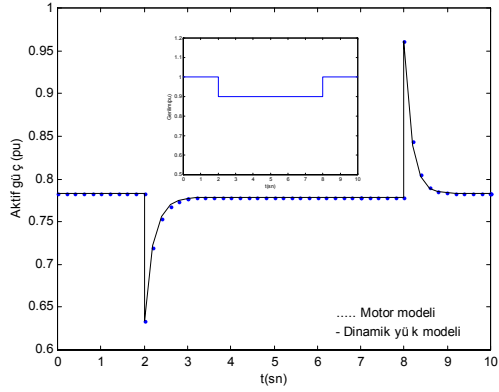
Bu bölümde denklem (14)'de verilen dinamik motor modeli ile dinamik yük modeli sonuçları karşılaştırılmıştır. Farklı karakteristik yapılara sahip iki asenkron motorun gerilim değişimlerine karşı verdiği cevaplar önce motor modeli ile ardından dinamik yük modeli ile elde edilerek sonuçlar Şekil 3 ve 4'de gösterilmiştir. Motorlara ait karakteristik değerler EK'de verilmiştir.  $t = 2$  saniyede meydana gelen bozucu etkiler sonrası gerilim değerlerinde meydana gelen azalmalar sonucunda aktif güçlerde de azalmalar sözkonusu olacaktır. Bu motorun sabit empedans karakteristiğine örnektir. I.Motor için farklı gerilim seviyelerinde elde edilen simülasyon sonuçları Şekil-3'de ayrı ayrı gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve dinamik yük modeline ait parametrik değerler Tablo 1'de verilmiştir. Burada  $V$  ikinci saniyede uygulanan adım gerilim değerlerini göstermektedir. Başlangıç gerilimi  $V_0 = 1$  pu'dur. Benzer şekilde II. Motora ait sonuçlar ve elde edilen model parametreleri de Şekil 4 ve Tablo 2'den görülebilir. Bulunan sonuçlara göre aktif güç gerilim azalması sonucunda azalmakta ve geline bu noktadan çok hızlı bir şekilde toparlanarak yeniden başlangıç değerine dönme eğilimine girmektedir. Ancak her iki motor türü için bu süre eşit değildir. Dolayısıyla dinamik yük modelindeki  $T_p$  değeri de farklı olacaktır. I. Motorun eylemsizlik sabiti daha büyük olduğundan toparlanma süresi de daha uzun olacaktır. Motor modeline göre çökmenin meydana geldiği gerilim seviyelerinde dinamik yük modeli yetersiz kalmıştır. Bu durumda bulunan  $\alpha_s$  değerleri iki modeli belli bir süre takip edebilen bir başka deyişle sürekli halde motorun ulaştığı  $P_{max}$  değeridir.

Tablo 1. Simülasyon sonucunda bulunan I.Motora ait güç ve yük modeli parametrik değerleri [pu]

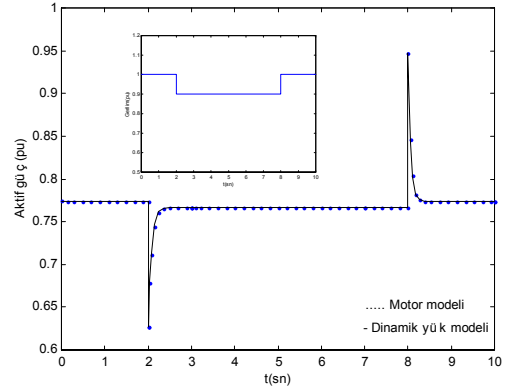
$V$	$P_0$	$P_t$	$P_s$	$\alpha_t$	$\alpha_s$	$T_p$
0.9	0.783	0.6343	0.7786	2	0.053	0.173
0.8	0.783	0.501	0.772	2	0.063	0.186
0.7	0.783	0.3837	0.7611	2	0.079	0.196
0.5	0.783	0.1958	çökme	2	0.380	0.149

Tablo 2. Simülasyon sonucunda bulunan II Motora ait güç ve yük modeli parametrik değerleri [pu]

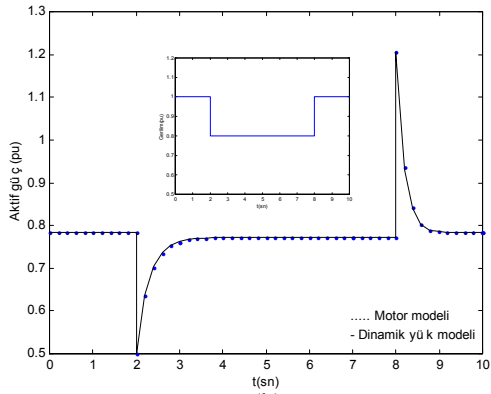
$V$	$P_0$	$P_t$	$P_s$	$\alpha_t$	$\alpha_s$	$T_p$
0.9	0.7736	0.6265	0.967	2	0.0812	0.058
0.8	0.7736	0.495	0.7575	2	0.0941	0.058
0.7	0.7736	0.379	0.7432	2	0.1121	0.058
0.4	0.7736	0.1237	çökme	2	0.4394	0,043



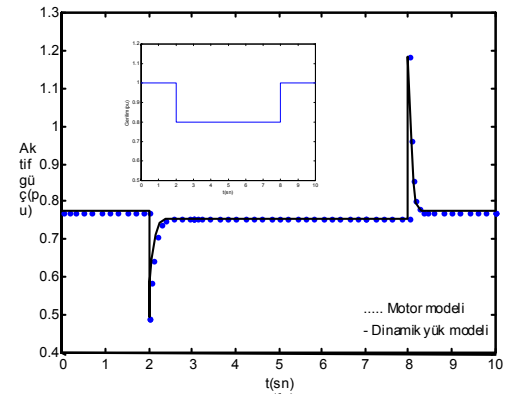
(a)



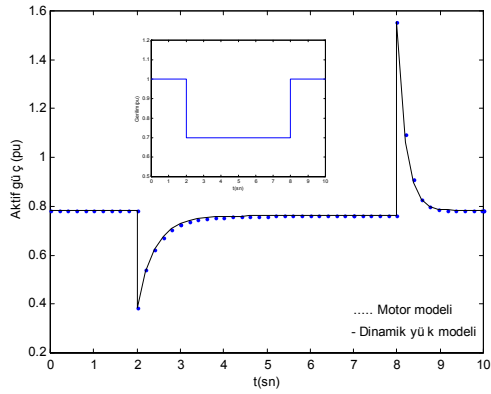
(a)



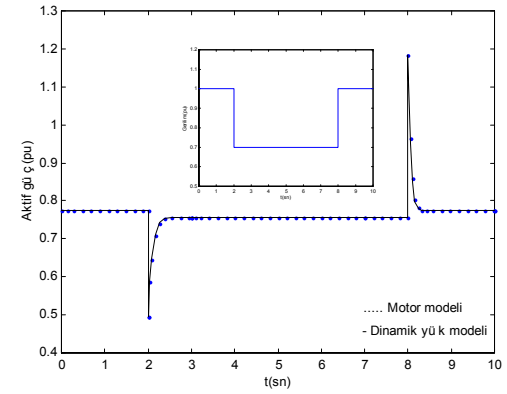
(b)



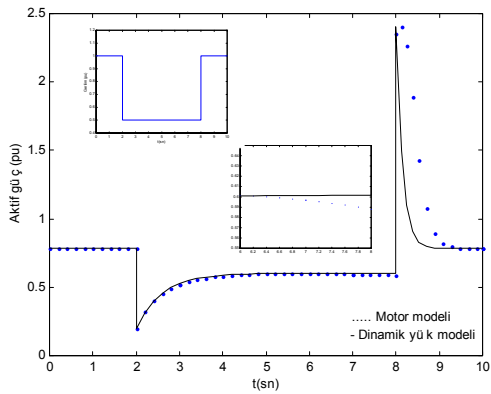
(b)



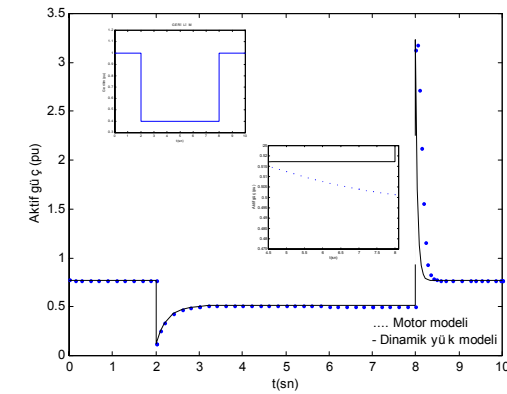
(c)



(c)



(d)



(d)

Şekil -3. I. Motor için farklı gerilim seviyelerinde motor ve dinamik yük modeli cevapları  
 (a)  $V=0.9$  pu (b)  $V=0.8$  pu (c)  $V=0.7$  pu (d)  $V=0.5$  pu

Şekil-4. II. Motor için farklı gerilim seviyelerinde motor ve dinamik yük modeli cevapları  
 (a)  $V=0.9$  pu (b)  $V=0.8$  pu (c)  $V=0.7$  pu (d)  $V=0.4$  pu

## IV.SONUÇLAR

Elektrik güç sistemlerinde motor yükleri önemli bir yere sahip olduğundan yük karakteristiğinin bilinmesi ve doğru bir şekilde modellenmenin yapılması gerek planlama ve kontrol açısından gerekse bir arıza sonrası davranışının tahmin edilmesi açısından önem taşımaktadır. Simülasyon sonuçları göstermiştir ki dinamik yük modelleri motor yüklerinin gerilim değişimlerine karşı dinamik cevaplarını yaklaşık olarak yakalamaktadır (bkz. Şekil 3-4a,b,c). Ayrıca küçük ve büyük motorların yapıları gereği karakteristikleri farklı olacağından tek bir motor modeli yerine ayrı ayrı modeller kullanılması (bilhassa büyük motorlar için) daha faydalı olacaktır. Zira büyük motorların ataletleri gereği toparlanma süreleri küçük motorlara nazaran daha uzundur. Dinamik yük modellerinin düşük gerilim seviyelerinde cevabı gerçeği yansıtmamaktadır. Nitekim yapılan simülasyon çalışmalarında  $V_4$  gerilim değerlerinde motor yükleri sistemden ayrılmakta ve olası bir gerilim çökmesi olayını tetikleyebilmektedir. Ancak dinamik yük modelinin bu seviyede verdiği sonuçlar sistemin kararlılık ve planlama çalışmalarında olumsuz bir rol oynayacaktır. Bu nedenle düşük gerilim seviyelerinde daha dikkatli olmak gerekir. Dinamik motor modelinde ulaşılan sürekli hal değerleri motorun  $P_0$  gücüne yakın fakat eşit değildir. Bu nedenle dinamik yük modelinde  $\alpha_s = 0$  alınması doğru bir yaklaşım olmamaktadır. Nitekim logaritmik ifadelerle bulunacak  $\alpha_s$  değerleri modelde yerine konacak olursa daha doğru sonuçlar elde edilecektir.

## V. KAYNAKLAR

- [1] A.Borghetti, L.Caldon, A.Mari, C.A.Nucci, Wilsun Xu, Yakout Mansour, B.C.Hydro “On Dynamics Load models for Voltage Stability”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.12, No.1, pp.293-303, February 1997
- [2] Yongsheng Wang, “Power System Load Modelling” *Preliminary report, prepared for Transpower NZ Ltd*, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Auckland, May 1997
- [3] Stefan Arnborg, Göran Anderson, David J.Hill, Ian A.Hiskens “On Influence of Load Modelling for Undervoltage Load Shedding Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.13, No.2, pp.395-400, May 1998
- [4] Chiev-Yann Chiou, Chiang-Tsang Huang, Wen-Shiow Kao “Dynamic Load Modelling in Taipower System Stability Studies” IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.2, pp.907-913, May 1995
- [5] M.Taleb, M.Akbaba, E.A.Abdullah, “Aggregation of Induction Machines for Power System Dynamic Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9 No.4, pp.2042-2048, November 1994

- [6] R.Hung, H.W.Dommel “Synchronous Machine Models for Simulation of Induction Motor Transients” IEEE Transactions on Power Systems, Vol.118, No.2, pp.833-838, May 1996
- [7] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Load Representation for Dynamic Performance Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8 No.2, pp.472-481, May 1993
- [8] Chiev-Yann Chiou, Chang-Horng Huang, An-Shin Liu, Yung-Tien Chen, Tai-Hsiung Li, Chia-Jen Lin, Hsiao-Dong Chiang, Jen-Lun Yuan, “Development of a Micro-processor-based Transient Data Recording System for Load Behavior Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.2, pp.16-22, February 1995
- [9] Wilsun Xu, Yakout Mansour, B.C.Hydro “Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models” IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.1, pp.479-486, February 1994
- [10] Thierry Van Cutsem, Costas Vournas, “Voltage Stability of Electric Power Systems”, Power electronics and Power Systems series, Kluwer Academic Publishers, 1998
- [11] Daniel Karlsson, David J.Hill “Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems” IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No.1, pp.157-166, February 1994
- [12] Carson W.Taylor, “Power System Voltage Stability”, EPRI Power System Engineering Series, McGraw Hill, 1994
- [13] IEEE Committee Report, “Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation” IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10 No.3, pp.1302-1313, August 1995
- [14] Chee-Mun Ong, “Dynamic Simulation of Electric Machinery”, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1998
- [15] [www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/powersys/preface3.shtml](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/powersys/preface3.shtml)

## VI. EK

Simülasyon çalışmalarında iki farklı tip motor kullanılmıştır. Bunlara ait karakteristik değerler aşağıdadır.

I.motor için:  $P = 20\text{HP}$ , 3 fazlı, 220 V, 60 Hz,  
 $J = 2.8 \text{ kg.m}^2$ ,  $x_m = 1.7989 \text{ pu}$ ,  $r_s = 0.032 \text{ pu}$ ,  
 $x_s = 0,066 \text{ pu}$ ,  $x_r = 0.066 \text{ pu}$ ,  $r_r = 0.023 \text{ pu}$ ,  
 $T_m = 1 \text{ pu}$  (sabit)

II.Motor için:  $P = 3\text{HP}$ , 3 fazlı, 220 V, 60 Hz,  
 $J = 0.089 \text{ kg.m}^2$ ,  $r_s = 0.0201 \text{ pu}$ ,  $x_s = 0,0349 \text{ pu}$ ,  
 $x_m = 1.208 \text{ pu}$ ,  $x_r = 0.0377 \text{ pu}$ ,  $r_r = 0.0377 \text{ pu}$ ,  
 $T_m = 1 \text{ pu}$  (sabit) [14,15].