

3 Fazlı 600 kW Gücünde Kısa Devre Kafesli Rotorlu Asenkron Motorun Tasarımı: Fiziksel Boyutlandırılması ve Elektriksel Hesaplamaları

Yunus KAYA^{1*}, Aykut COŞKUN²

¹Bayburt Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, 69000 Bayburt, Türkiye

²Bayburt Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 69000 Bayburt, Türkiye

Geliş / Received: 15/11/2019, Kabul / Accepted: 19/12/2019

Öz

Kısa devre kafesli rotorlu asenkron motorlar yapımı kolay, dayanıklı, işletme güvenliği yüksek, bakım ihtiyacı az ve muadillerine göre ucuz olduklarından sanayide ve birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada, 3 fazlı, 600 kW aktif gücünde, şebeke gerilimi 400 V, çalışma frekansı 50 Hz, kutup çifti 2, kutup sayısı 4, verimi 0.95 ve güç faktörü 0.93 olan kısa devre kafesli rotorlu asenkron motor tasarımı, fiziksel boyutlandırılması ve elektriksel hesaplamaları ile yapılmıştır. Öncelikli olarak tanımlanan tasarım kriterleri ve performans değerlerine bağlı olarak motorun ana boyutları, daha sonra stator ve rotorun fiziksel boyutlandırılması ve elektriksel hesaplamaları, endüksiyonlar ve magnetik alan şiddetleri, stator ve rotor ağırlıkları, kayıplar ve verim hesaplanmıştır. Yapılan analiz sonuçları, tasarlanan asenkron motorun istenen güç değerlerini ve tasarım performans kriterlerini sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motor, kısa devre kafesli rotor, motor tasarımı, fiziksel boyutlandırma ve elektriksel hesaplama

Design of Asynchronous Motor With 3 Phase 600 kW Power Short Circuit Cage Rotor: Physical Dimensioning and Electrical Calculations

Abstract

Asynchronous motors with short circuit caged rotor are easy to build, durable, high operational safety, low maintenance requirements and cheaper than their counterparts, so they are widely used in industry and in many areas. In this study, design of asynchronous motor with short circuit caged rotor with 3 phase, 600 kW active power, mains voltage 400 V, operating frequency 50 Hz, pole pair 2, pole number 4, efficiency 0.95 and power factor 0.93, physical dimensioning and electrical calculations were made. Firstly, main dimensions of motor according to the design criteria and performance values defined, then physical dimensioning of the stator and rotor and electrical calculations, inductions and magnetic field intensities, stator and rotor weights, losses, and efficiency were calculated. The results of the analysis showed that the designed asynchronous motor meets the required power values and design performance criteria.

Keywords: Asynchronous motor, short circuit cage rotor, motor design, physical dimensioning, and electrical calculation

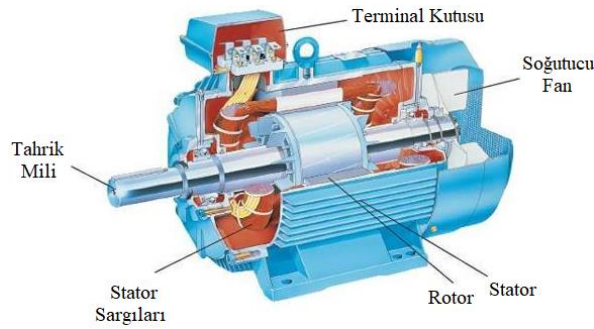
1. Giriş

Asenkron motorlar (endüksiyon motorları) endüstride en fazla kullanılan motorlardır.

Asenkron motorların devir sayıları yükte çok az değişir ve bu motorlar sabit devirli motorlar sınıfına girerler. Doğru akım şönt motorlarında devir sayısı büyük sınırlar

içinde değiştirilebilir. Hâlbuki endüksiyon motorunun devir sayısı sınırlı olarak bir veya iki kademeli değiştirilir. Bu yönden doğru akım şönt motoru asenkron motordan üstündür. Ancak asenkron motorlar daha ucuzdur ve daha az bakıma ihtiyaç duyarlar. Dahası asenkron motorların çalışması sırasında elektrik arki meydana gelmez (Doğru akım motorları çalışırken kollektör dilimleri ile fırçalar arasında kıvılcımlar çıkar) (Xu et al., 2002; Naderi, 2016; Barakin et al., 2018; Fireteanu et al., 2018; Xiao et al., 2018; Khlifi, 2019; Perach and Kvatinsky, 2019; Wuerdig et al., 2019).

Bu özellikler, asenkron motorların endüstride en çok kullanılan motorlar olmalarına sebep olmuştur. Asenkron motorların yapısını inceleyecek olursak asenkron motorun önemli parçaları Şekil 1’de gösterilmiştir. Asenkron motorlar genel olarak stator ve rotor olmak üzere iki kısımdan yapılmışlardır (Sackan, 1998).

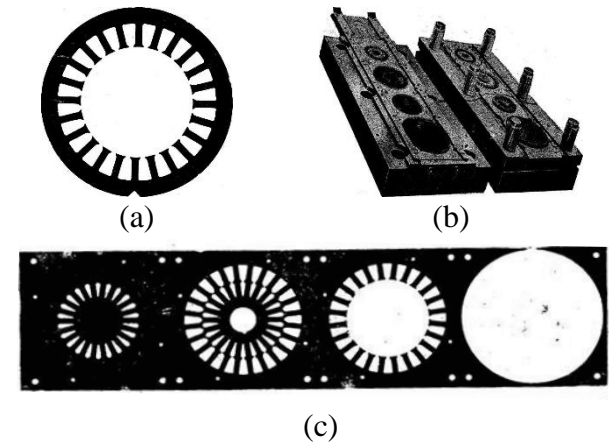


Şekil 1. Asenkron motorların yapısı (<https://www.muhendisbeyinler.net/asekron-motorlar-nedir-asekron-motorlarin-yapisi/>)

1.1. Stator

Stator, asenkron motorun duran kısmıdır. 0.4-0.5 veya 0.8 mm kalınlığında silisyumlu saclar özel kalıplarla preste basılır. Şekil 2 (a)’de presten çıkan bir stator sacı, Şekil 2(b)’de stator ve rotor saclarını birlikte

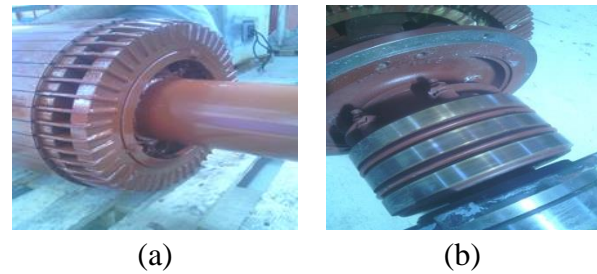
aynı zamanda basan kalıp ve Şekil 2(c)’de stator ve rotor sargılarının kalıpla birlikte basılış işlemi görülmektedir. Stator sargıları paketlenince üç fazlı sargıların yerleştirileceği stator nüvesi elde edilir. Bu nüve stator gövdesinin içine sıkıca yerleştirilir. Gövdeye motorun ayakları monte edilir. Gövdeye motor kapakları takılır, motor kapakları ortalarındaki bilyeli yataklar statorun ortasında dönecek olan rotora yataklık eder (Sackan, 1998).



Şekil 2. (a) Stator sacı, (b) stator ve rotor sac kalıbı ve (c) sacın kalıpla basılış işlemi (Sackan, 1998).

1.2. Rotor

Asenkron motorun dönen kısmına rotor denir. Kısa devreli rotor (sincap kafesli rotor) ve sargılı rotor (bilezikli rotor) olmak üzere iki çeşit rotor vardır. Şekil 3’de kısa devreli rotor ve bilezikli rotor görülmektedir (Sackan, 1998).



Şekil 3. Asenkron motor rotorları (a) kısa devreli rotor ve (b) bilezikli rotor (<https://www.elektrikport.com/teknik->

kutuphane/asenكرون-motorlar-1-bolum/12177#ad-image-0)

1.2.1. Kısa devreli rotor (sincap kafesli rotor)

Stator gibi silisyumlu saclar, kalıpla preste kesilerek paket edildikten sonra rotor kanalları içine alüminyum eritilerek pres dökümle kısa devre kafes sargıları meydana getirilir. Rotorun iki tarafında rotor çubuklarını kısa devre eden halkalarda, alüminyum döküm yapılırken küçük kanatçıklar meydana getirilir. Bu kanatçıklar pervane görevi görerek motorun soğumasını sağlar (Sackan, 1998).

1.2.2. Sargılı rotor (bilezikli rotor)

Sacları paketleyerek silindir şeklinde yapılan rotorun üzerindeki oluklara 3 fazlı alternatif akım sargısı yerleştirilir. 120° faz farklı olan üç fazlı sargılar yıldız veya üçgen bağlandıktan sonra çıkarılan 3 uç, rotor miline yalıtılarak yerleştirilen 3 bileziğe bağlanır (Sackan, 1998).

2. Materyal ve Metot

2.1. 3 fazlı 600 kW gücünde kısa devre kafesli rotorlu asenkron motor tasarımı

Bu çalışmada, 3 fazlı, 600 kW aktif gücünde, şebeke gerilimi 400 V, çalışma frekansı 50 Hz, kutup çifti 2, kutup sayısı 4, verimi 0.95 ve güç faktörü 0.93 olan kısa devre kafesli rotorlu asenkron motor tasarımı yapılacaktır.

Asenkron makinenin faz sayısı $m = 3$, aktif gücü $P = 600$ kW, şebeke gerilimi $U_1 = 400$ V, çalışma frekansı $f = 50$ Hz, çift kutup sayısı $p = 2$, verim $\eta = 0.95$, güç faktörü $\cos\phi = 0.93$ şeklinde gösterilir. Buradan devir n , $n = f60/p$ denklemi yardımıyla 1500 dev/dk bulunur. Motorun nominal sanal gücü P_{sn} , P_{sn}

= $P/(\cos\phi\eta)$ 'dan 679.12 kVA olarak bulunur. Nominal akım I_{1n} ise,

$$I_{1n} = \frac{P}{\cos\phi\eta\sqrt{3}U_1} \quad (1)$$

denklemden 980.22 A olarak elde edilir. Stator iç çapı D_i 'yi bulmak için Boduroglu (1994)'deki ilgili grafiğe bakılır ve $2p = 4$ için 600 kW'a karşılık gelen $D_i = 53$ cm olarak tespit edilir. Stator iç çapı bulunduktan sonra kutup taksimatı τ_p , $\tau_p = \pi D_i/4$ 'den 41.7 cm hesaplanır. Faydalanma katsayısı C 'yi bulmak için ise Boduroglu (1994)'deki ilgili grafiğe bakılır ve $2p = 4$ için 600 kW'a karşılık gelen $C = 4$ kWdk/m³ bulunur.

Faydalanma katsayısı da bulunduğuna göre, fiktif endüvi uzunluğu L_i ,

$$L_i = \frac{P_{sn}}{CD_i^2n} \quad (2)$$

denklemden 0.4029 m olarak elde edilir. Bu değer yuvarlanarak $L_i = 40.3$ cm alınır. Statorda iki soğutma kanalı ($z_{k1} = 2$) bulunacak, hava kanalı uzunluğu $b_{k1} = 10$ mm olacak ve kanallar hariç sac paketi uzunluğu $L_a = 401$ mm olduğuna göre, toplam stator uzunluğu L_{top1} , $L_{top1} = L_a + z_{k1}b_{k1}$ 'den 421 mm olacaktır. Hava aralığı δ , 5 mm olarak seçilmiştir ve Boduroglu (1994)'deki ilgili grafikten $\delta = 5$ mm için $b'_k = 9$ mm alınıp fiktif endüvi uzunluğu L_i ,

$$L_i = L_{top1} - z_{k1}b'_k \quad (3)$$

denklemden $L_i = 403$ mm olarak elde edilir. Stator sargısı ağzı yarı kapalı oluklardan, iletkenleri yuvarlak tellerden oluşan iki tabakalı ve iletkenleri oluk ağzından oluk içine boşaltılan tipte olacaktır. 600 kW'lık makinenin toplam oluk sayısı $N_1 = 48$ olarak seçilirse, kutup ve faz başına

stator oluk sayısı q , $q = N_1/(2pm)$ 'den 4 olarak bulunur. Statora ait oluk taksimatı τ_{01} ise, $\tau_{01} = D_1\pi/N_1$ 'den 3.47 cm olarak hesaplanır. Daha sonra hava aralığı endüksiyon genliği B_δ (hava aralığı manyetik akı yoğunluğu) 0.65 T ve doyma faktörü k_d 1.5 değerinde seçilirse Boduroglu (1994)'deki ilgili grafikten $\alpha_1 = 0.75$ ve form faktörü k_{f1} 0.98 bulunur. Buna göre makinenin ana akısı Φ , $\Phi = B_\delta\alpha_1\tau_p L_1$ 'den 0.0819 Wb olarak hesaplanır. $E_1 = 219$ V değerinde belirlenirse σ_1 değeri,

$$\sigma_1 = \frac{U_1/\sqrt{3}}{E_1} - 1 \quad (4)$$

denklemden 0.0545 olarak elde edilir. Stator sargısının faz başına sarım sayısı w_1 , harmonikler hesaba katılmadan yani sargı faktörü $\xi_1 = 1$ alınarak

$$w_1 = \frac{E_1}{4.44f_1 k_{f1} \xi_1 \Phi} \quad (5)$$

denklemden 12.2908 olarak elde edilir. Ondalık şeklinde sarım sayısı olmayacağından dolayı 12.2908 değerini "12" olarak kabul edebiliriz. Kabul ettiğimiz bu değere bağlı olarak yeni hava aralığı endüksiyon genliği B_δ ,

$$B_\delta = \frac{w_{1(eski)}}{w_{1(yeni)}} B_\delta \quad (6)$$

0.6658 T ve makinenin ana akısı Φ ,

$$\Phi = \frac{w_{1(eski)}}{w_{1(yeni)}} \Phi \quad (7)$$

0.0839 Wb'dir. Daha sonra seçilen sarım sayısı değerine bağlı olarak toplam iletken

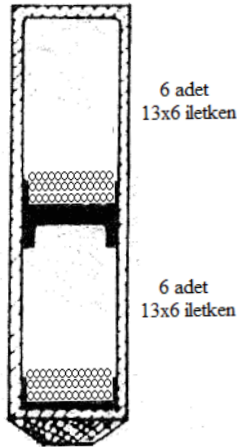
sayısı Z_1 , $Z_1 = 2mw_1$ 'den 72 olarak hesaplanır (4 tane paralel kollu sargı kullanılacaktır. Bu yüzden sarım sayısı 4 ile çarpılacaktır). Toplam oluk sayısı ve toplam iletken sayısı bilindiğine göre, oluk başına düşen iletken sayısı Z_0 , $Z_0 = Z_1/N_1$ 'den 1.5 bulunur. Şimdi sargıları oluklara yerleştirmemiz gerekir. Bunun için bir akım yoğunluğu seçip gerekli bakır tel kesitini belirlememiz gerekir. Akım yoğunluğu s_a 4 A/mm² olarak seçildi. Buna göre bakır kablo kesiti A , $A = I_{1n}/s_a$ 'dan 245 mm²'dir. Her bir iletkenin bakır kablo kesiti 245 mm² olduğuna göre ve iki tabakalı sargı yapılacağından dolayı toplam iletken kesitinin, $A = 2Z_0A$ 'dan 735 mm² olması gerekir. Yuvarlak tellerin yarı kapalı oluk ağzından rahatlıkla oluk içerisine boşaltılabilmeleri için bobinler dört paralel devreli olacak ve her bir paralel devre iletkeni iki kısmi iletkene bölünecektir (yani iki tabakalı sargı yapılacaktır). Buna göre oluk başına düşen iletken sayısı $Z_0 = 4Z_0$ 'dan 6 olur ve böylece iki tabakalı sargı yapılacaktır. Her bir tabakada 6 iletken bulunacaktır. 6 adet iletkenin de toplam kesiti 735 mm² olacaktır. İletken çapı D , 1 mm olacaktır.

Tablo 1'e göre 1 mm çapındaki bakır telin laklı ve iplikle yalıtılmış çapı $D' = 1.18$ mm olarak alınmıştır. Stator sargısı, bobin telleri ağzı yarı kapalı oluklara, oluk ağzından boşaltılmak sureti ile hazırlanacaktır. Alt tabakadaki bobin yanı üst tabakadakinden ve üst tabakadaki bobin yanı oluk ağzı kamasından başlıklarla yalıtılacaktır.

Tablo 1. Yuvarlak tellerin izolasyon ilavesi (ölçüler mm'dir) (Boduroglu, 1994)

| Çap | Yuvarlak Teller | | | |
|--|------------------------|--------------------|---------------------|-------------|
| | 0.8 ile 1.0 | 1.0 ile 1.5 | 1.5 ile 3.0 | 3.0 ile 4.0 |
| Laklı | 0.05 | 0.06 | 0.07 | - |
| 1 defa etrafı iplikle sarılmış | 0.12 | 0.12 | 0.15 | - |
| 2 defa etrafı iplikle sarılmış | 0.22 | 0.22 | 0.26 | 0.30 |
| 1 defa etrafı iplikle sarılmış ve laklı | 0.17 | 0.18 | 0.22 | - |
| 2 defa etrafı iplikle sarılmış ve laklı | 0.27 | 0.28 | - | - |
| Etrafı asbest ipliği ile sarılmış | 0.25 | 0.30 | 0.30 | 0.40 |
| Etrafı asbest ipliği ile sarılmış ve laklı | 0.30 | 0.36 | 0.37 | 0.47 |
| Boyutlar | Dikdörtgen İletkenler | | | |
| | 1 × 2 ile 2.5 × 4.8 | 1 × 5 ile 4 × 6 | 1 × 8 ile 4 × 10 | |
| Etrafı asbest ipliği ile sarılmış | 0.36 | 0.40 | 0.50 | |
| Etrafı asbest ipliği ile sarılmış ve laklı | 0.41 | 0.46 | 0.56 | |

Oluklarda her bir bobin yanında genişliğine 13'er ve derinliğine 6 olmak üzere 78 kısmi iletkene ayrılacaktır. 2 tabaka ve her tabakada 6 iletken olduğundan bu kısmi iletkenlerin toplam sayısı 936 olacaktır. Bobin yanlarının oluğa yerleştirilmiş hali Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Bobin yanlarının oluğa yerleştirilmiş hali

Oluk genişliği:
İletkenler $13 \times 1.18 = 15.34$ mm
Kılıf $2 \times 0.5 = 1$ mm
Toplam genişlik: 16.34 mm

Oluk Derinliği:
İletkenler $72 \times 1.18 = 84.96$ mm
Kılıf $2 \times 0.5 = 1$ mm
Toplam derinlik: 85.96 mm

Oluk genişliği b_{01} , 16.34 mm'dir ve oluk derinliği h_{01} , 86 mm olarak seçilmiştir. Dış genişliği b_{d1} 'i kabataslak hesaplırsak, $b_{d1} = \pi D_i / (2N_1)$ 'den 17.34 mm buluruz. Bu dış genişliğine sargılar sığar. Dış başı genişliği yani dışın en dar olduğu yer b_{dmin} ,

$$b_{dmin} = \frac{\pi D_i}{N_1} - (13D' + 0.1 \text{ cm}) \quad (8)$$

denklemden 1.83 cm olarak elde edilir. Buradan dış başı endüksiyonu B_{dmax1} , demir dolgu faktörü k_{fe} 0.91 alınarak

$$B_{dmax1} = \frac{L_i \tau_{01}}{k_{fe} L_{top1} b_{dmin}} B_{\delta} \left(1 + \frac{2}{3} \sigma_1 \right) \quad (9)$$

denklemden 1.3763 T bulunur. Dış başı endüksiyonu için verilmiş olan değerlerin alt sınırına yakın olan bu değerlerle hesabımıza devam edebiliriz. Stator ortalama sarım uzunluğu l_{cu1} 'i hesaplayabilmek için l_{bb} hesabı,

$$l_{bb} = \frac{\pi}{2p} \left(D_i + \frac{2}{3} h_{01} \right) + 30 \quad (10)$$

denklemden 492 mm olarak yapılır. Stator ortalama sarım uzunluğu l_{cu1} ise $l_{cu1} = 2(L_{top1} + l_{bb})$ denklemden 1826 mm bulunur. Buna

göre stator sargısının toplam uzunluğu L_{cu1} , $L_{cu1} = mw_1 l_{cu1}$ denkleminde 65736 mm olarak elde edilir. Kullanılan bakırın 20 °C'deki özgül direnci ρ_{cu} , 0.0216 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ve stator bakır kesiti q_{cu1} , $q_{cu1} = I_{1n}/s_a$ denkleminde 245 mm^2 olmak üzere, her bir fazın 75 °C işletme sıcaklık derecesindeki omik direnci R_1 , $R_1 = \rho_{cu} L_{cu1}/(mq_{cu1})$ denkleminde 0.0019 Ω/faz olarak hesaplanır. Bakırın özgül ağırlığı γ_{cu} , 8.9 g/cm^3 'dür. Buna göre stator sargısının toplam bakır ağırlığı G_{cu1} , $G_{cu1} = \gamma_{cu} L_{cu1} q_{cu1}$ 'den 144 kg'dır. Stator sargısının çevre akım yoğunluğu A_1 , $A_1 = I_{1n} Z_1/(\pi D_i)$ 'den 42.39 kA/m 'dir. Stator boyunduruğu endüksiyonu için ortalama bir değer olarak $B_{b1} = 1.20$ T alınmıştır. Böylece boyunduruuk yüksekliği h_{b1} ,

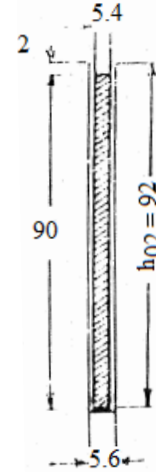
$$h_{b1} = \frac{\Phi(1+\sigma_1)}{2k_{fe} L_a B_{b1}} \quad (11)$$

denkleminde 0.101 m ve stator dış çapı $D_{dış}$, $D_{dış} = D_i + 2h_{01} + 2h_{b1}$ 'den 90.4 cm bulunur. Yüksek çubuklu, akım yığılmalı rotor tasarımı yapılacaktır. Yüksek harmonikleri önlemek için rotor oluk sayısı stator oluk sayısının 7/6'sı kadar alınacaktır. Buna göre rotor oluk sayısı N_2 , 56'dır. Rotor iletken sayısı da oluk sayısına eşittir. Yani $Z_2 = N_2 = 56$ 'dır. Rotor oluk adımı τ_{02} , $\tau_{02} = \pi D_i/N_2$ 'den 2.97 cm'dir. Şekil 5'deki gibi 600 kW, 1500 dev/dk'luk rotorunda akım yığılmalı çubukları bulunan kısa devre kafesli rotor oluşu kullanılacaktır.

Oluk ağzı açık olup $a_{02} = 2$ mm'dir. Çubuk boyutlarının eni ($b_{çk}$) 5.4 mm ve yüksekliği ($h_{çk}$) de 90 mm'dir. Buna göre çubuk kesiti $q_{çk}$, $q_{çk} = b_{çk} h_{çk}$ 'den 486 mm^2 'dir. Her bir çubukta boşta şebeke frekansında endüklenen EMK $E_{çk}$,

$$E_{çk} = U_1 \frac{1}{1+\sigma_1} \frac{1}{2pqZ_0\xi_1} \quad (12)$$

denkleminde 3.951 V olarak hesaplanır.



Şekil 5. 600 kW, 1500 dev/dk'luk rotorunda akım yığılmalı çubukları bulunan kısa devre kafesli rotorun oluşu

Kayma s , 0.025 olarak seçildiğinde, Boduroglu (1994)'deki ilgili grafikten $P = 600$ kW ve $n = 1500$ dev/dk değerlerine bağlı olarak sürtünme kaybı P_{kstme} 5700 W ve sürtünme kaybına vantilatör kayıpları da eklenirse, $P_{kstme} = 6000$ W olur. Buna göre çubuk akımı $I_{çk}$, yüzey ve pulzasyon kayıpları ihmal edildiğinde,

$$I_{çk} = \frac{P + P_{kstme}}{Z_2 E_{çk} (1-s)} \quad (13)$$

denkleminde 2809 A olarak hesaplanır. Halka akımı I_{ha} ise, $I_{ha} = N_2 I_{çk}/(2\pi r)$ 'den 12518 A'dır. Kısa devre halkasının boyutları (19×160) mm ve oluk genişliği de 2 cm olarak alınacaktır. Yani $b_{ha} = 19$ mm, $h_{ha} = 160$ mm ve $b_{02} = 2$ cm'dir. Buna göre dış dibindeki dış genişliği b_{dmin2} , $b_{dmin2} = \tau_{02} - b_{02}$ 'den 0.97 cm elde edilir. Halka kesiti q_{ha} ise, $q_{ha} = b_{ha} h_{ha}$ denkleminde 3040 mm^2 olarak hesaplanır. Çubuk ve halka akım yoğunlukları sırasıyla $s_{çk}$ ve s_{ha} , $s_{çk} = I_{çk}/q_{çk}$

ve $Sh_a = I_{ha}/q_{ha}$ denklemlerinden sırasıyla 5.78 A/mm² ve 4.12 A/mm² bulunur.

Rotorun omik ve reaktif dirençleri bir defasında akım yığılması gözetilmeyerek ve bir defasında da akım yığılması gözetilerek hesap edilecektir. Bunlardan ilki nominal yükteki devir sayısı da dahil olmak üzere küçük kaymalar için ve ikincisi yol alma hesabında geçerlidir. Akım yığılması gözetilmeksizin her bir faz için rotor omik direncinin hesabı yapılacak olursa, çubuk için kullanılan bakırın 20 °C'deki özgül direnci, $\rho_{\text{çk}} = \rho_{ha} = \rho_{cu} = 0.0216 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ 'dir. Çubuk uzunluğu $l_{\text{çk}}$, $l_{\text{çk}} = 1.25L_{\text{top1}}$ 'den 526.25 mm olur. Ortalama halka çapı D_{ha} , $D_{ha} = D_i - (h_{ha} - 2\delta)$ denkleminde 360 mm olarak hesaplanır. Buna göre her bir faz için rotor omik direnci R_2 ,

$$R_2 = \rho_{\text{çk}} \frac{l_{\text{çk}}}{q_{\text{çk}}} + \rho_{ha} \frac{D_{ha} N_2}{2\pi p^2 q_{ha}} \quad (14)$$

$2.91 \times 10^{-5} \Omega$ olarak elde edilir. Primere indirgeme faktörü \dot{u}_1 ,

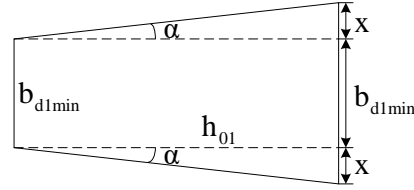
$$\dot{u}_1 = 4 \frac{m}{N_2} (w_1 \xi_1)^2 \quad (15)$$

denkleminde 31 olduğuna göre, statora indirgenmiş rotor direnci R'_2 , $R'_2 = R_2 \dot{u}_1$ 'den $9.021 \times 10^{-4} \Omega$ 'dur. Rotor boyunduruğu endüksiyonu için ortalama bir değer olarak B_{b2} , 1.22 T alınmıştır. Ve böylece boyunduruk yüksekliği h_{b2} ,

$$h_{b2} = \frac{\Phi/2}{k_{fe} L_a B_{b2}} \quad (16)$$

denkleminde 0.09423 m bulunur. Çubuk ve halkaların toplam ağırlığını hesaplayacak olursak; çubuk ağırlığı $G_{\text{çk}}$, $G_{\text{çk}} = \gamma_{cu} Z l_{\text{çk}} q_{\text{çk}} 10^{-3}$ 'den 127.47 kg ve halkaların ağırlığı G_{ha} ise, $G_{ha} = \gamma_{cu} \pi D_{ha} q_{ha} 10^{-3}$ 'den

30.60 kg olarak elde edilir. Stator dış genişliklerine bakacak olursak, daha önceden stator dişlerinin en dar genişliğini bulmuştuk.



Şekil 6. Stator ve rotor oluk şekli

Şekil 6'da $2\alpha = 360^\circ/N_1$ ve $x = h_{01} \tan \alpha$ olup; oluk şekline bağlı olarak stator dişlerinin maksimum genişliği b_{d1max} ,

$$b_{d1max} = 2h_{01} \tan\left(\frac{180^\circ}{N_1}\right) + b_{d1min} \quad (17)$$

denkleminde 2.96 cm ve stator dişlerinin ortalama genişliği b_{d1ort} da $b_{d1ort} = (b_{d1min} + b_{d1max})/2$ 'den 2.40 cm olarak elde edilir. Stator dişlerinin minimum, ortalama ve maksimum genişliklerine bağlı olarak ise stator diş endüksiyonların hesaplayabiliriz. Maksimum stator diş endüksiyonunu daha önceden bulmuştuk. Ortalama stator diş endüksiyonu B_{d1ort} ,

$$B_{d1ort} = \frac{L_i \tau_{01}}{k_{fe} L_{\text{top1}} b_{d1ort}} B_\delta \left(1 + \frac{2}{3} \sigma_1\right) \quad (18)$$

denkleminde 1.0494 T ve minimum stator diş endüksiyonu B_{d1min} ,

$$B_{d1min} = \frac{L_i \tau_{01}}{k_{fe} L_{\text{top1}} b_{d1max}} B_\delta \left(1 + \frac{2}{3} \sigma_1\right) \quad (19)$$

denkleminde 0.8509 T hesaplanır. Bulduğumuz stator diş endüksiyonlarına bağlı olarak Boduroglu (1994)'deki ilgili mıknatıslanma eğrilerinden $p_1 < 3$ W/kg'lık sac için magnetik alan şiddetleri $H_{d1max} = 11$ A/cm, $H_{d1ort} = 4.2$ A/cm ve $H_{d1min} = 3$ A/cm elde edilir. Simpson kuralına göre stator

dişlerindeki ortalama magnetik alan şiddeti H_{d1} , $H_{d1} = (H_{d1max} + 4 H_{d1ort} + H_{d1min})/6$ 'dan 5.13 A/cm'dir. Daha önce rotorun minimum diş genişliğini hesap etmiştik. Rotor maksimum diş genişliği yine statorda olduğu gibi hesap edilecektir. Rotor maksimum diş genişliği b_{d2max} ,

$$b_{d2max} = 2h_{ha} \tan\left(\frac{180^\circ}{N_2}\right) + b_{d2min} \quad (20)$$

denklemden 2.77 cm ve rotor dişlerinin ortalama genişliği b_{d2ort} , $b_{d2ort} = (b_{d2min} + b_{d2max})/2$ 'den 1.87 cm'dir. Şimdi rotor diş endüksiyonlarını hesap edebiliriz. Rotor olukları arasındaki en dar yerde görülen endüksiyon B_{d2max} ,

$$B_{d2max} = \frac{L_i \tau_{02}}{k_{fe} L_a b_{d2min}} B_\delta \quad (21)$$

denklemden 2.2514 T, rotor olukları arasındaki ortalama yerde görülen endüksiyon B_{d2ort} ,

$$B_{d2ort} = \frac{L_i \tau_{02}}{k_{fe} L_a b_{d2ort}} B_\delta \quad (22)$$

denklemden 1.1678 T ve rotor olukları arasındaki en geniş yerde görülen endüksiyon B_{d2min} ,

$$B_{d2min} = \frac{L_i \tau_{02}}{k_{fe} L_a b_{d2max}} B_\delta \quad (23)$$

denklemden 0.7884 T olarak elde edilir. Bulduğumuz rotor diş endüksiyonlarına bağlı olarak Boduroglu (1994)'deki ilgili mıknatıslanma eğrilerinden $p_1 < 3$ W/kg'lık sac için magnetik alan şiddetleri $H_{d2max} = 400$ A/cm, $H_{d2ort} = 4$ A/cm ve $H_{d2min} = 2.5$ A/cm olarak elde edilir. Simpson kuralına göre rotor dişlerindeki ortalama magnetik alan şiddeti H_{d2} , $H_{d2} = (H_{d2max} + 4H_{d2ort} +$

$H_{d2min})/6$ 'dan 69.75 A/cm'dir. Şimdi hava aralığındaki magnetik gerilimi hesap edelim. Bunun için bazı faktörleri hesap etmemiz gerekir. Geniş dişler için Carter faktörü oluksuz çıkık kutuplu makinalarda olduğu gibi hesap edilecektir. γ_1 değeri,

$$\gamma_1 = \frac{(b_{01}/\delta)^2}{5 + b_{01}/\delta} \quad (24)$$

denklemden 1.2917 olur. Buna göre geniş dişler için Carter faktörü k_{c1} , $k_{c1} = \tau_{01}/(\tau_{01} - \gamma_1\delta)$ 'den 1.2287 elde edilir. Rotordaki dar dişler için de Carter faktörü, stator ve rotoru oluklu makinalarda olduğu gibi hesap edilir. γ_2 değeri,

$$\gamma_2 = \frac{(b_{02}/\delta)^2}{5 + b_{02}/\delta} \quad (25)$$

denklemden 1.7778 olarak elde edilir. Buna göre rotor dar dişleri için Carter faktörü k_{c2} , $k_{c2} = \tau_{02}/(\tau_{02} - \gamma_2\delta)$ 'den 1.4271'dir. Buna göre Carter faktörü k_c , $k_c = k_{c1}k_{c2}$ 'den 1.7535 hesaplanır. Carter faktörü bilindiğine göre hava aralığındaki magnetik gerilim V_δ , $V_\delta = 0.8k_c\delta B_\delta 10^{-4}$ denklemden 4.7×10^3 A elde edilir. Her iki hava aralığındaki magnetik gerilim $2V_\delta$, 9.4×10^3 A'dir. Stator dişlerindeki toplam magnetik gerilimin hesabı için l_{d1} , $l_{d1} = b_{d1min} + b_{d1ort} + b_{d1max}$ denklemden 7.19 cm ve stator dişlerindeki toplam magnetik gerilim $2V_{d1}$, $2V_{d1} = 2l_{d1}H_{d1}$ denklemden 73.77 A elde edilir. Rotor dişlerindeki toplam magnetik gerilimin hesabı için l_{d2} , $l_{d2} = b_{d2min} + b_{d2ort} + b_{d2max}$ denklemden 5.61 cm ve rotor dişlerindeki toplam magnetik gerilim $2V_{d2}$, $2V_{d2} = 2l_{d2}H_{d2}$ denklemden 782.6 A elde edilir. Stator boyunduruğunun uzunluğu l_{b1} , boyunduruk ortasında ölçülen kutup taksimatına eşittir. Buna göre l_{b1} ,

$$l_{b1} = \frac{\pi(D_{dış} - h_{b1})}{2p} \quad (26)$$

denklemden 63.07 cm elde edilir. Rotor boyunduruğunun uzunluğu l_{b2} , boyunduruk ortasında ölçülen kutup taksimatına eşittir. Bunun hesabı için $D_{riç}$, $D_{riç} = D_i - 2(\delta + h_{ha} + h_{b2})$ 'den 1.154'dir. Buna göre rotor boyunduruğunun uzunluğu l_{b2} ,

$$l_{b2} = \frac{\pi(D_{riç} + h_{b2})}{2p} \quad (27)$$

denklemden 8.31 cm olarak elde edilir. Stator ve rotor boyunduruklarının kısmi magnetik gerilimleri, Boduroglu (1994)'deki ilgili miknatislanma eğrilerinden $p_1 < 3$ W/kg'lık sac için magnetik alan şiddetleri $B_{b1} = 1.20$ T ve $B_{b2} = 1.22$ T için sırasıyla $H_{b1} = 6.5$ A/cm ve $H_{b2} = 7$ A/cm olduğuna göre, stator boyunduruğunun magnetik gerilimi V_{b1} , $V_{b1} = l_{b1}H_{b1}$ 'den 410 A ve rotor boyunduruğunun magnetik gerilimi V_{b2} , $V_{b2} = l_{b2}H_{b2}$ 'den 58.17 A'dir. Magnetik devrenin toplam magnetik gerilimi θ_{tam} devre, θ_{tam} devre = $\Sigma V = 2V_{\delta} + 2V_{d1} + 2V_{d2} + V_{b1} + V_{b2}$ 'den 10724 Amper-sarım'dır. Miknatislanma akımının efektif değeri I_{μ} ,

$$I_{\mu} = \frac{p \Sigma V}{0.9mw_1 \xi_1} \quad (28)$$

denklemden 622 A olup bu değer nominal akımın (980.22 A) % 67.54'ü kadardır. Başlangıçta doyma faktörünü 1.5 olarak almıştık. Şimdi yeniden hesap edersek,

$$k_d = \frac{2V_{\delta} + 2V_{d1} + 2V_{d2}}{2V_{\delta}} \quad (29)$$

1.09 buluruz. $y/\tau_p = 8/9$ kırışlenme için Boduroglu (1994)'deki ilgili grafikten $k_{cu} = 0.945$ ve $k_o = 0.91$ olarak saptanır. Oluk dağılıma iletkenliği Λ_{01} 'i bulmak için $b_0 = 10$

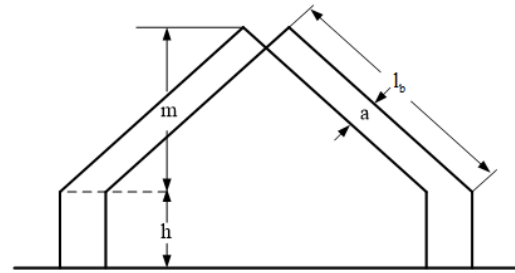
mm, $b_4 = 4$ mm, $h_2 = 1.5$ mm, $h_3 = 2$ mm, $h_4 = 1.5$ mm ve

$$b_3 = \frac{b_0 - b_4}{2.3 \log(b_0/b_4)} \quad (30)$$

denklemden $b_3 = 6.55$ mm tanımlamaları yapılmıştır. Yukarıda verilenlere göre λ_{01} ,

$$\lambda_{01} = k_{cu} \frac{h_{01}}{3b_0} + k_o \left(\frac{h_2}{b_0} + \frac{h_3}{b_3} + \frac{h_4}{b_4} \right) \quad (31)$$

denklemden 3.4646 elde edilir. Boduroglu (1994)'deki ilgili grafikten $b_k'' = 2.5$ mm alınır ve aktif stator uzunluğu l_{01} , $l_{01} = L_{top1} - 2b_k''$ denklemden 416 mm olarak bulunursa oluk dağılıma iletkenliği Λ_{01} , $\Lambda_{01} = (l_{01}/q)\lambda_{01}$ 'den 36.0318 bulunur.



Şekil 7. Kısmi bobinleri boy ve şekil bakımından birbirine eşit olan iki tabakalı tambur sargının bobin başı

Şekil 7'de kırışlenme faktörü $y/\tau_p = 8/9$, yan yana duran iki kısmi bobin cephe bağlantıları arasındaki aralık $a_1 = 3$ mm, bobin başında her bir bobinin yalıtılmış olarak genişliği $b_{k1} = 9$ mm, ortalama oluk taksimatı $\tau_{aort1} = 24$ mm, h yüksekliği 20 mm olarak seçildiğinde ve y/τ_p kırışlenmesine tekabül eden kırışlenme faktörünün 1. harmoniği ξ_{a1} ,

$$\xi_{a1} = \sin\left(\frac{\pi y}{2 \tau_p}\right) \quad (32)$$

denklemden 0.9848'dir. Bir sarım tarafından kavranan diş sayısı y_{d1} ,

$$y_{d1} = \frac{y}{\tau_p} \frac{N_1}{2p} \quad (33)$$

73.92 olarak hesaplandığına göre bobin başı dağılma iletkenliği Λ_{bb1} ,

10.67'dir ve m_1 değeri,

$$\Lambda_{bb1} = 1.13 \xi_{sa1}^2 (h + 0.5m_1) \quad (35)$$

$$m_1 = \frac{y_{d1} \tau_{aort1} (b_{b1} + a_1)}{2\sqrt{\tau_{aort1}^2 - (b_{b1} + a_1)^2}} \quad (34)$$

denklemden 62.4230 olarak elde edilir. Tablo 2'den $q = 4$ ve $y/\tau_p = 8/9$ için K katsayısının değeri, 0.0060 alınmıştır.

Tablo 2. Üç ve iki fazlı sargılarda hava aralığı dağılmasının hesabında yararlanılan K katsayısının muhtelif kirişlenme (y/τ_p) ve q oluk sayılarındaki değerleri

| b | | Üç Fazlı Sargılar | | | | | | İki Fazlı Sargılar | |
|-------|------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|
| | | y/τ_p | | | | | | | |
| q = 2 | y/τ_p | 1.0 | 0.835 | 0.66 | | | | 1.0 | ~ 0.66 |
| | K | 0.0265 | 0.0205 | 0.0199 | | | | 0.0717 | |
| q = 3 | y/τ_p | 1.0 | 0.89 | 0.78 | 0.66 | | | 1.0 | ~ 0.66 |
| | K | 0.0129 | 0.0103 | 0.0090 | 0.0097 | | | 0.0388 | 0.0177 |
| q = 4 | y/τ_p | 1.0 | 0.92 | 0.835 | 0.75 | 0.66 | | 1.0 | ~ 0.66 |
| | K | 0.0082 | 0.0066 | 0.0055 | 0.0051 | 0.0061 | | 0.0270 | 0.0107 |
| q = 5 | y/τ_p | 1.0 | 0.935 | 0.865 | 0.8 | 0.735 | 0.66 | 1.0 | ~ 0.66 |
| | K | 0.0059 | 0.0050 | 0.0038 | 0.0034 | 0.0038 | 0.0044 | 0.0216 | 0.0075 |
| q = 6 | y/τ_p | 1.0 | 0.935 | 0.865 | 0.8 | 0.735 | 0.66 | 1.0 | ~ 0.66 |
| | K | 0.0059 | 0.0050 | 0.0038 | 0.0034 | 0.0038 | 0.0044 | 0.0216 | 0.0075 |

Buna göre hava aralığı veya çift halkalanma dağılma iletkenliği Λ_{ha1} ,

$$\Lambda_{ha1} = \tau_p L_1 \frac{m}{\pi^2} \frac{1}{k_c k_d \delta} K \quad (36)$$

denklemden 3.2071 olarak elde edilir. Stator için iletkenlikler hesaplandıktan sonra stator sargısının dağılma reaktansı $X_{1\sigma}$,

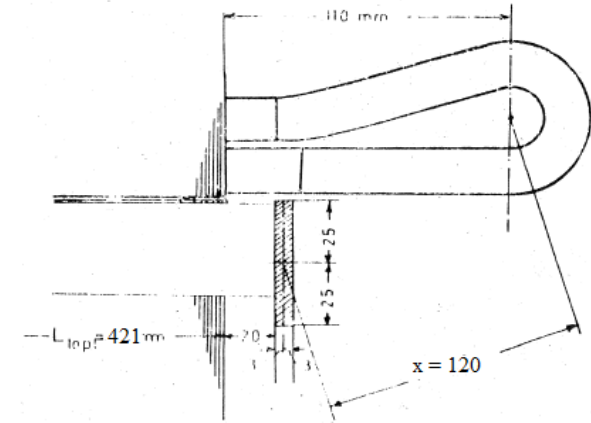
$$X_{1\sigma} = 1.6\pi^2 \frac{f}{p} w_1^2 (\Lambda_{o1} + \Lambda_{bb1} + \Lambda_{ha1}) 10^{-8} \quad (37)$$

denklemden 0.0578 Ω olarak hesaplanır. Aktif rotor uzunluğu l_{02} 'nin aktif stator uzunluğu l_{01} 'e eşit olduğu kabul edilmiştir. Buna göre λ_{02} ,

$$\lambda_{02} = \frac{h_{01}}{3b_{02}} + \frac{h_2}{b_{02}} \quad (38)$$

denklemden 1.5083'dür. Rotor oluk dağılma iletkenliği Λ_{02} , $\Lambda_{02} = l_{02}\lambda_{02}$ 'den

62.7453'dür. Şekil 8'deki makina boyutlarına tekabül eden x uzaklığı 120 mm'dir. y değeri ise, $y = 0.223(b_{ha} + h_{ha})$ 'dan 39.917 mm'dir.



Şekil 8. Rotor kafesinin yüksek çubuklu akım yığılmalı olması halinde halka ve bobin başı düzeni

Boduroglu (1994)'deki ilgili grafikten $\tau_p/x = 3.47$ ve $x/y = 3$ için g_{bb} , 0.14 alınır. Buna göre bobin başı dağılma iletkenliği Λ_{bb2} ,

$$\Lambda_{bb2} = \frac{Z_2}{2pm} \tau_p g_{bb} \quad (39)$$

iletkenliği Λ_{ha2} 'yi hesaplamak için K_2 değerini bilmemiz gerekir.

denkleminde 27.244 olarak elde edilir. Hava aralığı veya çift halkalanma dağılıma

Tablo 3. Kısa devre kafesli rotorun $Z_2/2p$ 'ye bağlı olarak $K_2 = \sum_v \left[1 / \left(2 \frac{Z_2}{2p} v \pm 1 \right) \right]^2$ 'nin değerleri

| $Z_2/2p$ | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| $\sum_v \left[1 / \left(2 \frac{Z_2}{2p} v \pm 1 \right) \right]^2$ | 0.097 | 0.053 | 0.036 | 0.023 | 0.017 | 0.013 | 0.010 | 0.0083 |
| $Z_2/2p$ | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | ∞ |
| $\sum_v \left[1 / \left(2 \frac{Z_2}{2p} v \pm 1 \right) \right]^2$ | 0.0057 | 0.0036 | 0.0021 | 0.0013 | 0.0009 | 0.0005 | 0.0003 | 0.0000 |

K_2 değeri Tablo 3'den $Z_2/2p = 14$ değerine bağlı olarak 0.0043 olarak hesap edilir. Buna göre hava aralığı veya çift halkalanma dağılıma iletkenliği Λ_{ha2} ,

$$\Lambda_{ha2} = \frac{Z_2}{2pm} \frac{m}{\pi^2} \frac{\tau_p L_i}{k_c k_d \delta} K_2 \quad (40)$$

denkleminde 10.7259 olarak elde edilir. Rotor için iletkenlikler hesaplandıktan sonra akım yığılması gözlemlenmiş rotor sargısının dağılıma reaktansı $X_{2\sigma}$,

$$X_{2\sigma} = 0.8\pi^2 f (\Lambda_{o2} + \Lambda_{bb2} + \Lambda_{ha2}) 10^{-8} \quad (41)$$

denkleminde $3.9761 \times 10^{-4} \Omega/\text{faz}$ 'dır Stator sargısına indirgenmiş rotor reaktansı $X'_{2\sigma}$, $X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} u_1$ 'den 0.0123 Ω olarak elde edilir. Yol alma akımı ile kalkış momentini (motor durmakta iken $s = 1$) hesap edebilmek için akım yığılması hesaba katılarak rotorun omik direnci ile dağılıma reaktansının hesabı gerekir. Bilindiği gibi, akım yığılması yalnız rotorun oluklar içerisinde bulunan çubuklarında baş gösterir. Buna göre indirgenmiş iletken yüksekliği ζ , çubuklar

için oluk yüksekliği b_{o2} , $b_{o2} = b_{\zeta k} = 5.6 \text{ mm}$ olarak ve α değeri,

$$\alpha = 2\pi \sqrt{\frac{b_{\zeta k}}{b_{o2}} \frac{f}{\rho_{cu} 10^5}} \quad (42)$$

0.9387 olarak hesaplandıktan sonra indirgenmiş iletken yüksekliği ζ , $\zeta = \alpha h_{\zeta k}$ 'den 8.4483 cm^{-1} bulunur. Nümerik oluk derinliği T , $T = m\zeta = 8.4483$ ve Boduroglu (1994)'deki ilgili grafikten $K = 8.5$ olarak bulunur. Böylece akım yığılması gözlemlenerek kısa devre kafesi rotorun çubuk direnci hesaplanabilir. $l_{\zeta k \sigma}$ çubuğun oluk içinde akım yığılmasına uğradığı uzunluk olup, bu yaklaşık olarak fiktif oluk uzunluğuna eşittir. Buna göre akım yığılması gözlemlendiğinde kısa devre kafesli rotorun çubuk direnci $R_{\zeta k, s=1}$,

$$R_{\zeta k, s=1} = \frac{\rho_{cu} l_{\zeta k \sigma}}{q_{\zeta k}} K + \frac{\rho_{cu} (l_{\zeta k} - l_{\zeta k \sigma})}{q_{\zeta k}} K \quad (43)$$

denkleminde $1.9881 \times 10^{-4} \Omega$ olarak bulunur. Rotor direnci R_{ha} ,

$$R_{ha} = \rho_{\zeta k} \frac{D_{ha} N_2}{2\pi p^2 q_{ha}} \quad (44)$$

denkleminde $5.6994 \times 10^{-6} \Omega$ olduğundan $R_{2,s=1}$, $R_{2,s=1} = R_{\text{çk},s=1} + R_{\text{ha}}$ 'dan $2.0451 \times 10^{-4} \Omega$ olarak ve statora indirgenmiş rotor direnci $R'_{2,s=1}$, $R'_{2,s=1} = R_{2,s=1} \cdot \tau_1$ 'den $6.3398 \times 10^{-3} \Omega$ olarak elde edilir. Akım yığılması gözetilerek rotor sargısının dağılma reaktansını bulacak olursak; $X_{2\sigma}$,

$$X_{2\sigma} = 0.8\pi^2 f (\Lambda_{02}/2 + \Lambda_{\text{bb2}} + \Lambda_{\text{ha2}}) 10^{-8} \quad (45)$$

denkleminde $2.7375 \times 10^{-4} \Omega$ ve statora indirgenmiş rotor reaktansı $X'_{2\sigma}$, $X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot \tau_1$ 'den $8.5359 \times 10^{-3} \Omega$ elde edilir. Stator dağılma faktörü σ_1 ,

$$\sigma_1 = \frac{X_{1\sigma} I_{1\mu}}{U_1 - X_{1\sigma} I_{1\mu}} \quad (46)$$

0.1058 ve rotor dağılma faktörü σ_2 , $\sigma_2 = (X'_{2\sigma} / X_{1\sigma}) \sigma_1$ 'den 0.0156 hesaplanır. Yol alma veya kısa devre akımının hesabını yapmak amacıyla tahsisli L tipi eşdeğer devreden $s = 1$ için τ_1 , $\tau_1 = 1 + \sigma_1$ 'den 1.1058'dir. Kısa devre direnci R_k ,

$$R_k = \tau_1 R_1 + \tau_1^2 R'_{2,s=1} \quad (47)$$

denkleminde $9.8533 \times 10^{-3} \Omega$ olarak elde edilir. Kısa devre reaktansı X_k ,

$$X_k = \tau_1 X_{1\sigma} + \tau_1^2 X'_{2\sigma} \quad (48)$$

0.0744 Ω olarak hesaplandıktan sonra kısa devre akımı I_{1k} ,

$$I_{1k} = \frac{\tau_1 U_1}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (49)$$

denkleminde 5894 A elde edilir. Yol alma momenti M_{dy} ,

$$M_{dy} = \frac{60}{2\pi n} m \frac{U_1^2}{(R_1 + \tau_1 R'_2)^2 + X_k^2} R'_2 \quad (50)$$

497.25 Nm'dir. Kısa devredeki güç faktörü $\cos\phi_k$,

$$\cos\phi_k = \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (51)$$

denkleminde 0.1313 ve ϕ_k açısı ise 82.46° olarak bulunur. Stator sac paketindeki dişlerin toplam ağırlığı G_{d1} , demirin özgül ağırlığı γ_{fe} , 7.7 g/cm^3 alınarak,

$$G_{d1} = \left\{ \pi \left[\left(\frac{D_i + 2h_{01}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right] - N_1 b_{01} h_{01} \right\} k_{fe} L_a \gamma_{fe} 10^{-3} \quad (52)$$

denkleminde 278.11 kg bulunur. Diş yüksekliği h_{02} , $h_{02} = h_{\text{çk}} + 2 \text{ mm}$ 'den 92 mm'dir. Buna göre rotor sac paketindeki dişlerin toplam ağırlığı G_{d2} ,

$$G_{d2} = \left\{ \pi \left[\left(\frac{D_i}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i - 2h_{02}}{2} \right)^2 \right] - N_2 b_{02} h_{02} \right\} k_{fe} L_a \gamma_{fe} 10^{-3} \quad (53)$$

denkleminde 66.18 kg olarak elde edilir. Şimdi tasarladığımız makineye ait kayıpları hesap edebiliriz. Buna göre stator sargısı joule kayıpları $P_{\text{kc}u1}$,

$$P_{\text{kc}u1} = m I_{1n}^2 R_1 \quad (54)$$

denkleminde 5477 W, rotor sargısı joule kayıpları $P_{\text{kc}u2}$, $m_2 = N_2 = 56$ ve $I_{2n} = I_{\text{çk}} = 2809 \text{ A}$ eşitliklerinden sonra

$$P_{\text{kc}u2} = m_2 I_{2n}^2 R_2 \quad (55)$$

denkleminde 12859 W'dır. Kaymanın küçük olması nedeni ile motor normal çalışma durumundaki demir kayıpları ihmal edilecek derecede küçüktür. Dişlerdeki yüzey ve pulzasyon kayıplarının ise gözetilmesi gerekir. Statordaki yüzey kayıpları $P_{\text{ky}1}$ 'i bulmak için, açık ağızlı oluklarda hesap

edilen oluk ağzı aralığı genişliği $a_{o1} = 10$ mm seçildi. Boduroglu (1994)'deki ilgili grafikten $a_{o1}/\delta = 2$ için $\beta'_1 = 0.13$ olarak bulunur. Statorda 0.5 mm'lik sac kullanıldığından $k_{o1} = 2.5$ 'dir. Buna göre statordaki yüzey kayıpları P_{ky1} ,

$$P_{ky1} = \frac{k_{o1} \left(\frac{N_1 n}{10000} \right)^{1.5} \left(\frac{\tau_{01} \beta'_1 k_{c1} B_\delta}{0.1} \right)^2}{\pi D_i \frac{\tau_{01} - a_{o1}}{\tau_{01}} k_{fe} L_i} \quad (56)$$

denkleminde 143 W olarak elde edilir. Rotordaki yüzey kayıpları P_{ky2} ise, $a_{o2} = 10$ mm, $\beta'_2 = 0.13$ ve $k_{o2} = 2.5$ alınarak

$$P_{ky2} = \frac{k_{o2} \left(\frac{N_2 n}{10000} \right)^{1.5} \left(\frac{\tau_{02} \beta'_2 k_{c2} B_\delta}{0.1} \right)^2}{\pi D_i \frac{\tau_{02} - a_{o2}}{\tau_{02}} k_{fe} L_a} \quad (57)$$

denkleminde 165 W olarak elde edilir. γ_1 değeri,

$$\gamma_1 = \frac{(a_{o1}/\delta)^2}{5 + a_{o1}/\delta} \quad (58)$$

denkleminde 0.5714 bulunur. Stator pulzasyon endüksiyonu B_{p1} , $B_{p1} = \gamma_1 \delta B_{d1ort}/(2\tau_{01})$ 'den 0.0432 T olarak hesaplandıktan sonra sacların işlenmesinden ötürü Foucault kayıplarındaki artmayı kapsayan faktör $k_p = 1.9$ ve matrisel sabitesi

Tablo 4. En önemli sac nevelerinin matrisel sabiteleri

| Sac Nevileri (DIN 46400) | Δ mm | p_1 W/kg | $(p_h/p_1)100$ | $(p_w/p_1)100$ | σ_H | σ_w | $\sigma_w = \sigma_w \Delta^2$ |
|--------------------------|-------------|------------|----------------|----------------|------------|------------|--------------------------------|
| I 3.6 | 0.5 | 3.6 | 66.7 | 33.3 | 4.8 | 19.2 | 4.8 |
| II 3.0 | 0.5 | 3.0 | 78.3 | 21.7 | 4.7 | 10.4 | 2.6 |
| III 2.3 | 0.5 | 2.3 | 82.5 | 17.5 | 3.8 | 6.4 | 1.6 |
| IV 1.7 | 0.5 | 1.7 | 83.8 | 16.2 | 2.85 | 4.4 | 1.1 |

Buna göre stator dişlerindeki kayıplar P_{kd1} , $P_{kd1} = p_{d1} G_{d1}$ 'den 881 W bulunur. İşleme

Tablo 4'den $\sigma_w = 4.8$ alınmıştır. Buna göre stator pulzasyon kayıpları P_{kp1} ,

$$P_{kp1} = \frac{k_p}{2} \sigma_w \frac{1}{36} \left(\frac{N_1 n B_{p1}}{10000 \times 0.1} \right)^2 G_{d1} \quad (59)$$

denkleminde 341 W olarak elde edilir. γ_2 ,

$$\gamma_2 = \frac{(a_{o2}/\delta)^2}{5 + a_{o2}/\delta} \quad (60)$$

0.5714'dür. Rotor pulzasyon endüksiyonu B_{p2} , $B_{p2} = \gamma_2 \delta B_{d2ort}/(2\tau_{02})$ 'den 0.0562 T olarak hesaplandıktan sonra rotor pulzasyon kayıpları P_{kp2} ,

$$P_{kp2} = \frac{k_p}{2} \sigma_w \frac{1}{36} \left(\frac{N_2 n B_{p2}}{10000 \times 0.1} \right)^2 G_{d2} \quad (61)$$

denkleminde 187 W olarak elde edilir. % 10 emniyet payı ve çıplak çubukların oluklara sürülmesi dolayısıyla meydana gelecek ilave kayıpları gözetmek amacı ile % 30'luk bir ilave yapılması ile stator ve rotorun yüzey ve pulzasyon kayıpları veya demir kayıpları P_{kyp} , $P_{kyp} = (P_{ky1} + P_{ky2} + P_{kp1} + P_{kp2})1.1 \times 1.3$ 'den 1196 W elde edilir. Tablo 4'den p_1 , 2.3 W/kg alındıktan sonra dişlerdeki özgül demir kaybı p_{d1} ,

$$p_{d1} = 1.25 p_1 B_{d1ort}^2 \quad (62)$$

denkleminde 3.1661 W/kg hesaplanır.

faktörü $k = 1.25$, Boduroglu (1994)'deki ilgili grafiklerden $p = 2$, $D_i = 530$ mm ve $D_{dış}$

= 904 mm için histerisiz faktörü $k_{Hb} = 1.1$, foucault faktörü $k_{wb} = 1.3$ ve Tablo 4'den $p_1 = 2.3$ W/kg'lık sac için $\sigma_{11} = 3.8$ ve $\sigma_w = 1.6$ alındıktan sonra boyunduruktaki özgül demir kaybı p_{b1} ,

$$p_{b1} = k \left[\frac{k_{Hb} \sigma_{11} f}{100} + k_{wb} \sigma_w \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] B_{b1}^2 \quad (63)$$

4.698 W/kg'dır. Stator boyunduruğunun demir ağırlığı G_{b1} ,

$$G_{b1} = \gamma_{fe} k_{fe} L_i \pi 10^{-3} \cdot \left[\left(\frac{D_{dış}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i + 2h_{o1}}{2} \right)^2 \right] \quad (64)$$

719.5 kg olarak hesaplandıktan sonra stator boyunduruğundaki demir kayıpları P_{kb1} , $P_{kb1} = p_{b1} G_{b1}$ 'den 3380 W olur. İlave kayıplar P_{ilave} , nominal gücün % 0.6'sıdır. Dolayısıyla $P_{ilave} = 4075$ W'dır.

Tablo 5. Tasarlanan makinedeki kayıpların gösterimi

| Kayıp Adı | Gösterimi | Miktarı |
|--|-------------|---------|
| Stator sargısı joule kayıpları | P_{kcu1} | 5477 W |
| Rotor sargısı joule kayıpları | P_{kcu2} | 12859 W |
| Stator ve rotorun yüzey ve pulzasyon kayıpları | P_{kyp} | 1196 W |
| Stator dışlarındaki kayıplar | P_{kd1} | 881 W |
| Stator boyunduruğundaki demir kayıpları | P_{kb1} | 3380 W |
| Sürtünme ve vantilasyon kayıpları | P_{kstme} | 6000 W |
| İlave kayıplar | P_{ilave} | 4075 W |

Toplam kayıplar $\Sigma P_{kayıp}$, $\Sigma P_{kayıp} = P_{kcu1} + P_{kcu2} + P_{ilave} + P_{kd1} + P_{kb1} + P_{kyp} + P_{kstme}$ denkleminde 33868 W olup tüm kayıplar Tablo 5'de gösterilmiştir.

Nominal yükteki verim η_n , $\eta_n = P_{sn}/(P_{sn} + \Sigma P_{kayıp})$ 'dan % 95.25 değerinde olup başlangıçta verim 0.95 yani % 95 alınmıştır. Motorun nominal yükteki kayması s_n ,

$$s_n = \frac{m I_{2n}^2 R_2}{\Sigma P_{kayıp} + m I_{2n}^2 R_2} \quad (65)$$

denkleminde 0.02 olarak elde edilir. Motorun nominal yükte şebekeden çektiği aktif, yani vatlı güç P_w , $P_w = P_{sn}/\eta_n$ 'den 713 kW'dır. Motorun nominal yükte şebekeden çektiği reaktif yani vatsız güç P_{dew} ,

$$P_{dew} = m \left(E_1 I_{\mu} + X_{1\sigma} I_{1n}^2 + X_{2\sigma} I_{2n}^2 \right) 10^{-3} \quad (66)$$

803.6 kVar bulunur.

3. Sonuç

Bu çalışmada, 3 fazlı, 600 kW aktif gücünde, şebeke gerilimi 400 V, çalışma frekansı 50 Hz, kutup çifti 2, kutup sayısı 4, verimi 0.95, ve güç faktörü 0.93 olan kısa devre kafesli rotorlu asenkron motor tasarımı yapılmıştır. Öncelikle olarak tanımlanan tasarım kriterleri ve performans değerlerine bağlı olarak motorun tüm fiziksel ve elektriksel büyüklükleri hesaplanmıştır. Ve hesaplamaların sonuçlarına bağlı olarak motorun, istenen güç değerlerini ve tasarım performans kriterlerini sağladığı gösterilmiştir (Xu et al., 2002; Naderi, 2016; Barakin et al., 2018; Fireteanu et al., 2018; Xiao et al., 2018; Khelifi, 2019; Kvatinsky, 2019; Perach and Wuerdig et al., 2019).

4. Kaynaklar

Barakin, N. S., Vanurin, V. N., and Bogatyrev, N. I. 2018. "Features of Calculation of Asynchronous Generator With

- Autotransformer Wye-Connected Stator Winding”, *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, IEEE, Moscow, Russia, 1-4.
- Boduroglu, T. 1994. “Elektrik Makinaları Dersleri (Asenkron Makinaların Hesap ve Konstrüksiyonu)”, *Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.*, İstanbul.
- Fireteanu, V., Constantin, A. I., Leconte, V., and Lombard, P. 2018. “Analysis of the Evolution of Stator Short-circuit and Rotor Bar Breakage Faults in a Squirrel-cage Induction Motor”, *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, IEEE, Moscow, Russia, 190-195.
- Khelifi, M. A. 2019. “Analysis of an Off-Grid Self-Excited Dual Wound Asynchronous Generator for Wind Power Generation”, *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 6(6), 35-42.
- Naderi, P. 2016. “Cage-Rotor Induction Motor Inter-Turn Short Circuit Fault Detection With and Without Saturation Effect by MEC Model”, *ISA Transactions*, 64, 216-230.
- Perach, B. and Kvatinsky, S. 2019. “STT-ANGIE: Asynchronous True Random Number Generator Using STT-MTJ”, *2019 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, IEEE, Florence, Italy, 264-267.
- Sackan, A. H. (1998). “Elektrik Makinaları III”, *MEB*, İstanbul.
- Wuerdig, R. N., Sartori, M. L. L., and Calazans, N. L. V. 2019. “Asynchronous Quasi-Random Number Generator: Taking Advantage of PVT Variations”, *2019 IEEE 10th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*, IEEE, Armenia, Colombia, 137-140.
- Xiao, Y., Zhou, L., Wang, J., and Liu, J. 2018. “Design and Performance Analysis of Magnetic Slot Wedge Application in Double-Fed Asynchronous Motor-Generator by Finite-Element Method”, *IET Electric Power Applications*, 12(7), 1040-1047.
- Xu, B. Q., Li, H. M., and Sun, L. L. 2002. “Joint Detection of Stator Winding Inter-Turn Short Circuit and Rotor Bar Breaking Fault in Squirrel Cage Induction Motors”, *International Conference on Power System Technology*, IEEE, Kunming, China, 2, 761-764.
- <https://www.muhendisbeyinler.net/asenكرون-motorlar-nedir-asenكرون-motorlari-yapisi/>, Son erişim tarihi: 05.12.2019
- <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/asenكرون-motorlar-1-bolum/12177#ad-im-age-0>, Son erişim tarihi: 05.12.2019