

Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuğu Arızası Analizi İçin Bir Deney Seti Geliştirilmesi

Designing an Experimental Set For Induction Motors to Analyze Broken Rotor Bar Faults

M. Murat TEZCAN¹, A. İhsan ÇANAKOĞLU²

^{1,2} Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
¹tezcan@dumlupinar.edu.tr, ²acanakoglu@dumlupinar.edu.tr

Özet

Bir asenkron motorun hatalı çalışma şartlarında hassas analizi, kompleks bir problemdir. Bu çalışmada, asenkron motorlarda sıkça karşılaşılan rotor hatalarını deneysel olarak inceleyebilmek için bir deney seti geliştirilmiştir. Asenkron motorda meydana gelen arızaları laboratuvar koşullarında izleyebilmek ve meydana gelen arızalara müdahale edebilmek için geliştirilen deney seti sayesinde, yapılan simülasyonların gerçeğe yakın olup olmadığı konusunda daha net bir izlenime varılabilir. Yapılan deneylere dayanarak asenkron motorun çeşitli kırık rotor çubuğu durumlarında performansı izlenerek sağlam çalışma şartlarında alınan değerlere göre karşılaştırma imkanı bulunup, işletmelerde meydana gelebilecek rotor arızalarında, asenkron motorun performansında oluşacak değişiklikler modellenmeye çalışılabilir.

Abstract

In faulty working conditions, precise analysis of an induction motor is a complex problem. In this study, thanks to experimental methods, which are committed to these methods, indications of rotor failures in induction machines are investigated. Thanks to the experimental set, which is developed to monitor the failures in a laboratory environment and to record in the failures occurred in the rotor, a sharper impression can be gained concerning whether the simulations made are veridical or not. Regarding the experiments made, the performance of induction motor in the case of various broken rotor bars is monitored and thus the opportunity of comparing it to the rates that are taken in healthy working conditions is seized. Finally, it can be intended to model the changes that may occur in an induction motor at some point in rotor failures, which may happen in industry.

1. Giriş

Elektrik motorlarında meydana gelen hataların tarihi, elektrik motorlarının tarihi ile neredeyse yaşıttır. Üreticiler ve kullanıcılar, başlangıçta meydana gelen hatalar karşısında basit çözümleri benimsemektedirler. Bunlar daha çok aşırı akım korumaları, gerilim regülatörleri, topraklama önlemleri alınarak çözülebilmekteydi. Ancak elektrik makinelerinin

gelişimine paralel olarak, ortaya çıkan hata tiplerinin de artması ile hata teşhisi ve problemlerin çözülmesi de zorlaşmaya başlamıştır. Oluşan arızalar karşısında işletmelerin finansal kayıpları da artmaktadır. İşte bu nedenle hızlı hata tespiti ve arızaya müdahale önem kazanmıştır.

Yapılan çalışmaların bazılarında, asenkron motorlarda arıza tespiti üzerine kaynak taramaları yapılmış [1], bu sayede, bu alanda faaliyet gösteren araştırmacılara hızlı bir tarama yapma imkanı sunulmuştur. Bunun yanında, bazı çalışmalarda ise asenkron motor üreticilerinin ve kullanıcılarının hata teşhisi için yaptıkları çalışmaların arttığına dikkat çekilmiş, arıza analizinin önemi vurgulanmıştır [2].

En çok sorulan soru, bir asenkron motorun nasıl modelleneceği sorusudur. İster sağlıklı çalışma şartlarında ister herhangi bir hata veya arıza durumunda çalışmada ölçülen değerlere göre (Akım, gerilim, devir sayısı, kayma, vb) belli programların kullanılması ile durgun durum incelemesi ve hareketli simülasyonlar yapılabilir (ANSYS, FEMM vb.). Birkaç durgun ardarda eklenmesi ile de hareketli simülasyon oluşturulup eşdeğer devre parametreleri belirlenebilir.

Grant H. Müller ve Charles F. Landy, çalışmalarında kırık rotor barları tarafından üretilen ekstenel güce yönelik teorik ve deneysel araştırmaları detaylı olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışma hata incelemesi ve çubuklararası akım teorisi üzerinedir. Aynı zamanda bu çalışma, çubuklararası akımın ekstenel yönde güç üretmek için stator akısı ile etkileşime geçtiğini gösteren bir matematik model sunar. Modeli kanıtlamak ve desteklemek için yapılan çalışmada ise, kırık rotor çubuğu olan birkaç motor ile çalışılıp deneysel veriler elde edilmiştir [3].

D.G.Dorrell, T.J.E. Miller ve C.B.Rasmussen yaptıkları çalışmada üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun rotor kafesi akımlarının motor performansı üzerindeki etkilerini basit ama sonuç verici bir modelle açıklamaya çalışmışlardır. Model, standart eşdeğer devre içindeki rotor direnci ve reaktansı parametrelerinin elde edilmesi için çözülecek bir matris formundan oluşmaktadır. Aynı zamanda modifiye edilmiş (bir veya iki kısadevre halkası çıkarılmış) asenkron

motor rotoru ile yapılan testler sayesinde modelin doğruluğu kanıtlanmaya çalışılmıştır [4].

Anlatılan yöntemler her ne kadar pratik gibi görünse de, gerçekte sağlıklı veya arızalı olarak çalışan asenkron motor hakkında net bir yargıya varmamızı sağlayamayabilir.

Bu yüzden gerçek çalışmada, sağlıklı ve rotor arızaları (Kırık rotor çubuğu vb.) olan motorları , gerçek çalışma koşullarında test etmek, hata analizi yapmamızda ve arızaların giderilmesinde bize çok yardımcı olacaktır.

2. Arıza Modellemede Kullanılan Deney Setinin Tanıtımı

Deney setinin yapımında kullanılan asenkron motor, şekil 1’de etiket değerleri verilen, 3 kW gücünde, sincap kafesli asenkron motordur [5].

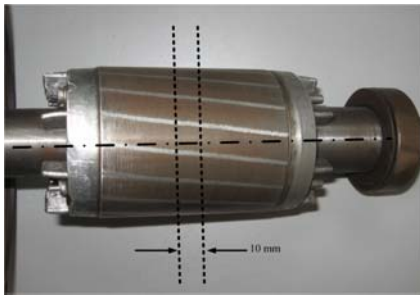


Tip	100L 28B3			
kW	3	PS	4	2844 d/dk.
V	380			6,6 A
Nr	100999			0,88 Cos φ
Faz	3	50 Hz	S1	
IP	55			İzole sını.

Şekil 1: ASM etiket değerleri.

2.1. Arıza Oluşturulacak Rotor Bloğunun İmal Edilmesi

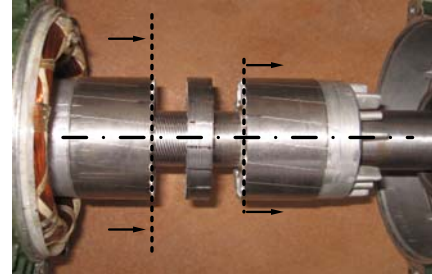
Öncelikle asenkron motorun söküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Motor kapakları, havalandırma fanı söküldükten sonra üzerinde işlem yapılacak olan rotor bloğu çıkarılmıştır. Rotor bloğunda, istenilen rotor barı kırığı arızasını verdirebilmek için, bir şekilde sincap kafes rotorun barlarının, kısa devre halkaları ile olan bağlantısının kesilmesi gerekmektedir. Bunun için rotor bloğunun orta kısmından 10 mm’lik sac paketinin alüminyum iletkenleri ile beraber çıkarılması tasarlanmıştır. Şekil 2’de yapılacak işlem gösterilmiştir.



Şekil 2: Rotor bloğunda tadilat yapılacak alanların belirlenmesi

Şekil 3’de rotor bloğunun parçalanma (3 bölge) işlemi gösterilmiştir. Ortadaki 10 mm kalınlığındaki disk şeklindeki parça alınıp yeniden imal edilmiştir. Bunun sebebi, çıkarılan parçada döküm olarak rotor saclarına yapışmış olan alüminyum barların yerlerinden sökülmesinin deformasyona sebep olmasıdır. Geriye kalan sağ ve soldaki büyük parçalar

üzerinde tadilat yapılmamıştır. Büyük parçalardan bir tanesi rotor milinden bağımsız olarak sökülüp takılabilmektedir.



Şekil 3: Rotor bloğunun üç parçaya ayrılması

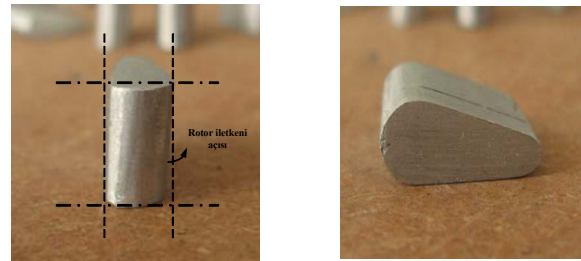
Parçalama işleminden sonra 80 mm çaplı ve 10 mm kalınlığında rotor sac paketinin imaline başlanmıştır. Bu işlemin yapılabilmesi için rotor çapına uyumlu sac parçalara gerek duyulmuştur. Sac parçalar imalatçı firmadan temin edilmiştir. Şekil 4’te rotor sacları görülmektedir.



Şekil 4: Rotor sac parçaları

Normal standartlarda rotor sac paketi oluşturulduktan sonra, demir döküm atölyelerinde rotor çubuklarını oluşturmak için sac paketi üzerindeki oluklara erimiş alüminyum dökümü yapılır.

1cm kalınlığında sac paketi içine erimiş alüminyumun dökülmesi laboratuvar koşullarında mümkün olmadığı için ve aynı zamanda istediğimiz rotor oluklarına istediğimiz kırılma hatasını verdiremeyeceğimiz için, daha önceden dökülmüş alüminyum parçalarını Makine Müh. Laboratuvarlarında oluk ölçülerine getirerek bir tesviye işlemi yapılmıştır.



(a) (b)

Şekil 5: Rotor alüminyum iletkenleri; a) Dikey görünüş b) Yatay görünüş

Rotor sac paketi oluklarına silme olarak geçebilen ve istediğimiz zaman çıkartabildiğimiz alüminyum parçaların

şekilleri, rotor geometrisinden dolayı diğer büyük rotor silindirlerine tam temas edebilmesi için sincap kafesin kesintisiz bir parçasıymış gibi tasarlanmıştır.

Şekil 6'da imal edilen rotor disk ve rotor oluklarına yerleştirilmek üzere tesviye edilmiş rotor iletkenleri görülmektedir.



Şekil 6: İmal edilen rotor disk ve alüminyum iletkenleri

Bu işlemden sonra istenen rotor slotlarından istenen alüminyum iletkenler sökülme suretiyle, asenkron motora istenen rotor kırığı arızası verilebilir. Şekil 7'de ise imal edilen, barları sökülüp takılabilen, rotor disk ve rotor bloğunu oluşturan parçalar ve sıkıştırma işleminde kullanılan vida ve destek halkaları görülmektedir.



Şekil 7: İmal edilen rotor bloğunun genel görünümü

Rotor bloğuna yerleştirilecek olan 10 mm kalınlığındaki rotor diskini, sabit olan diğer parçalara tam temas etmesi için sıkıştırma ve destek halkaları gerekmektedir. Şekil 8'de rotor slotlarının diğer rotor iletkenlerine teması için sıkıştırma işlemi görülmektedir. Sıkıştırma işlemi, yüksek hızlarda parçaların temas halinden şaşmaması için yapılmaktadır.



Şekil 8: Rotor parçalarının sıkıştırma işlemi

Birleştirme işlemi sonrasında rotor bloğunun son hali Şekil 8'de görülmektedir. Bu işlem sonrasında, montaj esnasında

rotor bloğu ile stator arasında kalan bölgede hava aralığına, imal edilen rotor diskini sürtünmesi üzerine torna tesviye işlemine ihtiyaç olmuştur. Yine makina mühendisliği laboratuvarında torna tezgahı ile tesviye işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlem Şekil 9'da görülmektedir.



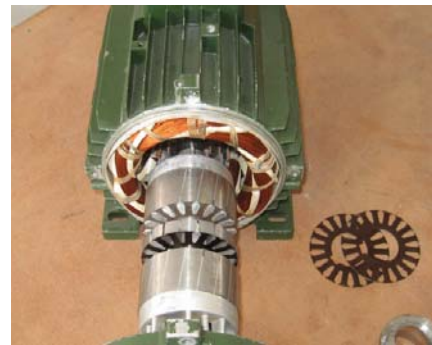
(a)



(b)

Şekil 9: a) Rotor bloğunun torna tezgahına yerleştirilmesi
b) Talaş alma işlemi

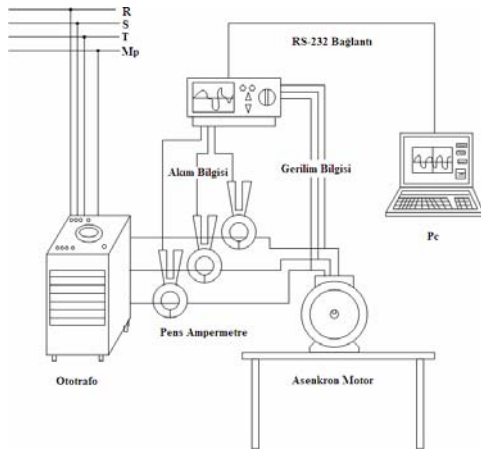
Torna tezgahında talaş alma işleminin ardından, Şekil 10'da asenkron motorun montaj öncesi son hali görülmektedir. Montaj işleminin ardından, asenkron motorun çalıştırılması işlemine geçilir. Motorun çalıştırılması 3 fazlı otorafosu yardımı ile yapılır. Üç fazın gerilim değeri sıfırdan itibaren kademeli olarak artırılarak bu işlem yapılır.



Şekil 10: Asenkron motorun montaj öncesi hali

2.2 Ölçüm (Değer Alma) İşlemi

Ölçüm (değer alma) işlemi ise, asenkron motorun çalışması esnasında, akım ve gerilim değerlerinin örnek alınıp işlenmesi ile yapılır. Bu işlem için, şebeke ile motor arasına bağlanan bir güç-harmonik analizörüne ihtiyaç duyulmuştur. Deneyde kullanılan güç-harmonik analizörü, üç fazlı sistem için ister faz-faz gerilim bilgisini, ister faz-nötr gerilim bilgisini alır, üç fazdan da aldığı akım bilgisi ile birlikte sistemin aktif güç, reaktif güç, gerilim akım harmonikleri, enerjisi hakkında bilgi verir. Şekil 11 (a)'da deney düzeneğinin şeması görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 11 (b)'de ise deney düzeneğinin laboratuvarındaki kurulumu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 11: a) Deney düzeneğinin şeması
b) Deney düzeneğinin laboratuvarındaki kurulumu

3. Boşta ve Kısa Devre Çalışmada Deney Değerlerinin Alınması

Tablo 1'de deneyde kullanılan asenkron motorun boşta ve kısa devre deneylerinden elde edilen, faz-faz gerilimleri, hat akımlarının ortalama değerleri ve şebekeden çekilen aktif güç değerleri verilmiştir.

Tablo 1: Asenkron motorun deney değerleri

MOTOR	BOŞTA ÇALIŞMA			KISA DEVRE ÇALIŞMA		
	U ₁₀ (V)	I ₀ (A)	P ₀ (W)	U _{1k} (V)	I _{1k} (A)	P _k (W)
SAĞLAM	381,29	4,592	154	216,18	7,615	2072
ROTORU KIRIKLI	383,14	4,692	160	242,10	7,628	2333
ROTORU 2 KIRIKLI	380,50	4,746	163	251,21	7,926	2412
ROTORU 3 KIRIKLI	380,53	4,849	180	266,27	7,989	2438

3.1. Deney Verilerinden Yararlanarak Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması

Tablo 1'deki değerlere göre eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması için, asenkron motorun 1 faz eşdeğer devre eşitlikleri kullanılmıştır. Bilindiği gibi eşdeğer devre parametreleri, asenkron motorun boşta çalışma değerleri ve kısa devre deneyi değerlerinden yararlanarak hesaplanmaktadır. Asenkron motorun demir direnci (R_C) ve mıknatıslanma reaktansı (X_M), eşitlik 1 ve 2'de verildiği üzere, boşta çalışma gerilimi, boşta çalışma akımı ve boşta çalışma güç katsayısına bağlıdır [6].

$$R_c = \frac{U_o / \sqrt{3}}{I_o \cos \phi_o} \quad (1)$$

$$X_M = \frac{U_o / \sqrt{3}}{I_o \sin \phi_o} \quad (2)$$

Yine benzer şekilde kısa devre deneyi verilerinden yararlanarak eşitlik 3 ve 4'te;

$$R_{1k} = P_k / 3(I_k^2) \quad \text{ve} \quad R_2 = R_{1k} - R_1 \quad (3)$$

$$Z_k = \frac{U_k / \sqrt{3}}{I_k}, \quad X_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} \quad \text{ve} \quad X_1 = X_2 = X_k / 2 \quad (4)$$

olarak kısa devre çalışma bileşenleri gösterilebilir. Burada R_{1k}, 1 faz eşdeğer kısa devre direnci, Z_k ise 1 faz eşdeğer kısa devre empedansıdır. Bu eşitliklere bağlı olarak, MATLAB programına M-file bölümüne küçük bir kod yazılarak bu değerler hesaplatılmıştır (Şekil 12).

```

Uo=380.53;
Io=4.549;
Po=180;
Uk=266.27;
Ik=7.889;
Pk=2438;
R1=1.6;
cosfo=Po/(1.73*Uo*Io);
sinfo=sin(acos(cosfo));
Rc=(Uo/1.73)/(Io*cosfo);
Xm=(Uo/1.73)/(Io*sinfo);
R1k=Pk/(3*(Ik^2));
R2=R1k-R1;
Zk=(Uk/1.73)/Ik;
Xk=sqrt(Zk^2-R1k^2);
X1=Xk/2;

```

Şekil 12: Eşdeğer devre parametrelerini hesaplayan M-file kodu

Tablo 2: Eşdeğer Devre Parametreleri

MOTOR	EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİ					
	R ₁ (Ω)	X ₁ (Ω)	R ₂ (Ω)	X ₂ (Ω)	R _C (Ω)	X _M (Ω)
SAĞLAM	1,6	5,64	10,3	5,64	944	48,0
ROTORU 1 KIRIKLI	1,6	6,28	11,7	6,28	917	47,2
ROTORU 2 KIRIKLI	1,6	6,55	11,1	6,55	888	46,4
ROTORU 3 KIRIKLI	1,6	7,22	11,1	7,22	804	45,4

Elde edilen eşdeğer devre parametrelerine göre; stator direnci dışındaki parametrelerde artış ve azalışlar görülmektedir. Stator ve rotor reaktanslarındaki artış, rotor magnetik alanında bir asimetri olarak ortaya çıkmaktadır. Arızalı rotor barı civarında, oluk kaçak akıplarının artması, reaktans değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Rotor direncinin artması ise, paralel bağlı olarak düşünülebilecek rotor barlarının eksilmesine bağlıdır.

Boşta çalışma bileşenleri olan demir direnci ve mıknatıslanma reaktansı değerlerinde azalma görülmektedir. Arızalı durumlarda boşta çalışma akımı artmaktadır. Bu durum yine motorun hava aralığındaki asimetriye bağlıdır.

Magnetik alana ait kuvvet çizgilerinin, arızalı rotor barı etrafında yoğunlaşması, hava aralığı relüktansını arttırmaktadır. Bu sebeple, sağlam duruma oranla, bu relüktansı yenmek üzere daha büyük Amper sarıma ihtiyaç duyulmaktadır.

Eşdeğer devre parametrelerinin değişimi, motor gücüne, stator ve rotor oluk geometrilerine ve kullanılan ferromagnetik malzemeye göre değişim göstereceğinden, artış ve azalışlar için belli bir yüzde oranı belirtmek mümkün olmayacaktır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada ; sanayide en çok kullanılan asenkron motorlarda meydana gelen rotor çubuğu arızaları analizi için geliştirilen deney düzeneği tanıtılmıştır. Rotor çubuklarının imalatı sırasında döküm işleminin tam yapılamaması sonucu ortaya çıkan bu arıza tipi için deneysel çalışma, ancak böyle bir motorun bulunması sonucunda yapılabilir. Ortaya çıkabilecek arıza tipi (arızalı rotor çubuğu sayısı ve bu çubukların komşuluk ilişkisi) çok çeşitli olabileceğinden, muhtemel her duruma karşılık gelen arızalı rotoru bulmak mümkün olmayabilir.

Mümkün olabilecek her türlü arıza tipini laboratuvar ortamında hazırlayıp, deneysel olarak inceleyebilmek amacıyla bu deney motoru geliştirilmiştir. Elde edilen rotor yapısında arızasız durum için elde edilen değerler, sağlam motorun değerleri olarak kabul edilmiştir. Rotor çubuklarının parçalı olması sebebiyle, parçaların kontak yüzeylerinde oluşan geçiş direnci sebebiyle, rotor direnci orjinal motorunkine nazaran bir miktar artmıştır.

Elde edilen rotor yapısı ile çok sayıda rotor çubuğu arızası oluşturulabilir. İncelemelerimizde 1., 2. ve 3. rotor çubuğunun arızalı olması durumları ele alınmıştır. Bu durumlar için makinanın boşta ve kısa devre deneyleri yapılarak eşdeğer

devre parametreleri elde edilmiş ve eşdeğer devre parametrelerindeki değişim verilmiştir. Ancak elde edilen eşdeğer devre parametrelerinden arıza tipini tespit etmek mümkün olmayacaktır. Amacımız zaten arıza tipini belirlemek olmamıştır.

Boşta ve kısa devre çalışma deneylerinden elde edilen değerler ışığı altında, yapılan deney setinin, rotor arızalarını modellemekte kullanılabileceği görülmektedir. bu deney seti kullanılarak, muhtemel bütün rotor arızaları oluşturulup, deneysel inceleme yapılabilir.

Deneylerden elde edilecek sonuçlarla (özellikle stator akımlarının harmonik analizi) diagnostik teknikler için bir database oluşturulabilir. harmonik analizler ve deney motorunun yük deneyleri ile işletme karakteristiklerinin elde edilmesi, laboratuvar imkanlarına bağlıdır.

İleriye dönük çalışmalar iki ana maddede toplanabilir :

- 1-) Elde edilen rotor yapısının mekanik yönden iyileştirilmesi.
 - a-) Kontak noktalarının temasının iyileştirilmesi, dolayısı ile rotor direncinin azaltılıp şebekeden çekilen akımın düşürülmesi.
 - b-) Rotor imalatı sırasında CNC tezgah kullanmak sureti ile metrik hataların en aza indirilmesi.
 - c-) Rotor saclarının paketleme işleminde sıkıştırmanın daha iyi yapılması.

- 2-) Diagnostik sistemler için stator akımlarının harmonik analizi ve sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması.

5. Kaynaklar

- [1] Arfat S., Yaddava G. S., Singh B., 2005, A Review of stator fault monitoring techniques of induction motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(2), pp.106-110.
- [2] Subhasis N., Toliyat H.A., Li X., 2005, Condition Monitoring and fault diagnosis of electrical motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(4), pp.719-721.
- [3] Müller G.H., Landy C.F., 2003, A novel method to detect broken rotor bars in squirrel cage induction motors when interbar currents are present, IEEE Transactions on Energy Conversion, 18(1), pp.71-78.
- [4] Dorrell D.G., Miller T., Rassmussen, 2001, Interbar currents in induction machines, IEEE Transactions on Magnetics, pp.729-736.
- [5] Tezcan M.M., 2008, Asenkron motorlarda kırık rotor barı arızalarının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.59-69.
- [6] Chapman, J., 1991, Electric Machinery Fundamentals, Mc Graw-Hill, Second Edition, Singapore, pp.548-565.