

# DENGESİZ GÜÇ AKIŞI ANALİZLERİ İÇİN SABİT HIZLI ASENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR TÜRBİNİ MODELİ BÖLÜM 2: YÜK AKIŞI UYGULAMALARI

Onur  
ÖZTÜRK<sup>1</sup>

Ahmet  
KÖKSOY<sup>1</sup>

M.Erhan  
BALCI<sup>2</sup>

M. Hakan  
HOCAOĞLU<sup>1</sup>

Bahtiyar  
DURSUN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gebze Teknik Üniversitesi  
Elektronik Müh. Böl.  
41400 Gebze KOCAELİ  
{akoksoy, onurozturk,  
hocaoglu}@gyte.edu.tr

<sup>2</sup>Balıkesir Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Müh. Böl.  
Çağış Yerleşkesi 10145  
BALIKESİR  
mbalci@balikesir.edu.tr

<sup>3</sup>Kırklareli Üniversitesi  
Enerji Sistemleri Müh. Böl.  
Kırklareli  
bahtiyar.dursun@kirkklareli.edu.tr

## ÖZET

[1]'de sunulan çalışmada; şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlü rüzgar türbinleri için dengesiz veya dengeli yük akışı analizlerinde kullanılmak üzere bir model önerilmiştir. Aynı çalışmada yapılan niteliksel ve niceliksel analizlerden, önerilen modelin hassasiyet - hesap verimliliği bakımından, literatürdeki diğer modellere (d-q model, kayma hesabı temelli fazör tanım bölgesi model, Sabit P,Q model ve Sabit P-Q(V+) model) göre avantajlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ise; önerilen model ve yük akışına pratikte uygulamaya müsait olan muadil modellerin (kayma hesabı temelli fazör tanım bölgesi model, Sabit P,Q model ve Sabit P-Q(V+) model), IEEE tarafından oluşturulan 34 baralı dengesiz radyal dağıtım test sisteminde yük akışı analizi için performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Asenkron generatör modeli, Enerji Dağıtım Sistemleri, Dengesiz Yük akışı.

## 1. GİRİŞ

Bu çalışmanın ilk kısmında önerilen model (Model 1) [1], kayma hesabı temelli fazör tanım bölgesi modeli (Model 2) [2], Sabit P-Q(V+) modeli (Model 3) [3] ve Sabit P,Q modeli (Model 4) [4], IEEE tarafından yayımlanan 34 baralı dengesiz radyal dağıtım test sisteminde [5] yük akışına uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca bu dört modelin performansları işlem karmaşıklığı açısından da değerlendirilmiştir.

Yük akışı analizleri OpenDSS (Open Distribution System Simulator) programı [6] ile gerçekleştirilmiştir. Delphi programında oluşturulan model kütüphane dosyaları (DLL (Dynamic Link Library)) ve OpenDSS programının kütüphaneleri kullanılarak modeller yük akışı analizine Matlab [7] ortamında entegre edilmiştir.

## 2. ÖNERİLEN MODELİN YÜK AKIŞI ANALİZİNE DAHİL EDİLMESİ

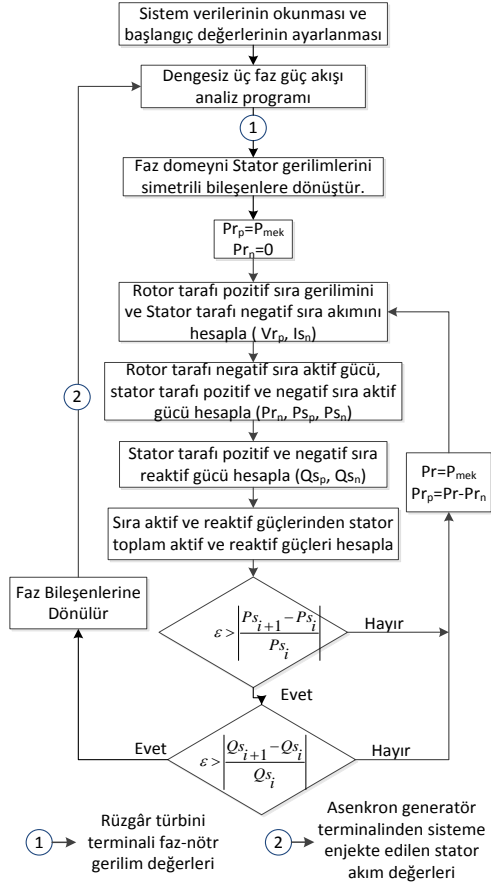
Önerilen modelin yük akışı analizlerine dahil edilebilmesi için oluşturulan Şekil 1'de verilmiş algoritma, temel olarak iki iteratif bloktan oluşmaktadır. Bu bloklardan ilki dengesiz üç faz yük akışı bloğu, diğeri ise asenkron generatör için

oluşturulan iterasyon bloğudur. Bu çalışmada dengesiz yük akışı, dağıtım sistemlerinde genellikle uygulanan sweep (süpürme) temelli algoritma [8] kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen modelin yük akışı analizine uygulanabilmesi için izlenen akış diyagramında, öncelikle [5]'de verilen hat empedansları, yük güçleri, transformator ve generatör bilgileri gibi veriler tanıtılmakta ve bara gerilimleri için başlangıç değerleri atanmaktadır. Bir sonraki adımda dengesiz üç faz yük akışı iterasyonu gerçekleştirilmektedir. Böylece asenkron makine için oluşturulan iterasyon bloğunda (Makine İterasyon Bloğu) kullanılmak üzere generatör terminal gerilimleri hesaplanmaktadır. Terminal gerilimi fazör değerlerinden pozitif ve negatif sıra bileşenlerine geçilerek; makine iterasyonunu gerçekleştirmek için gereken ilk adım atılmış olur. Bu durum Şekil 1'de 1 numara ile gösterilmektedir.

Makine İterasyonuna başlamadan önce modelde rotor tarafına ait pozitif sıra aktif gücünün ( $P_{rp}$ ), mekanik güce ( $P_{mek}$ ) eşit olduğu kabulü yapılır. Rotor tarafı negatif sıra aktif gücü ( $P_{rn}$ ) için başlangıç değeri sıfır kabul edilir. Makine iterasyon bloğunun ilk adımında pozitif sıra rotor gerilimi ( $V_{rp}$ ) ve hemen akabinde negatif sıra stator akımı ( $I_{rn}$ ) hesaplanır. Bu değerler elde edildikten sonra rotor tarafı negatif sıra aktif güç ve stator tarafı pozitif - negatif sıra aktif güç değerleri hesaplanır ( $P_{rn}$ ,  $P_{sp}$ ,  $P_{sn}$ ). Aynı şekilde stator tarafı pozitif ve negatif sıra reaktif güç ( $Q_{rn}$ ,  $Q_{sp}$ ,  $Q_{sn}$ ) değerleri hesaplanır. Bu adıma kadar olan süreçte stator ve rotor tarafında pozitif ve negatif sıra aktif - reaktif güç değerleri bulunmuştur. Stator tarafı üç faz toplam aktif - reaktif güçleri, pozitif ve negatif sıra aktif - reaktif güçlerinin toplamının üç katı şeklinde hesaplanır ( $P_s$ ,  $Q_s$ ). Bir önceki iterasyondan elde edilen  $P_s$  ve  $Q_s$  değerleri ile içinde bulunan mevcut iterasyon sonrasında hesaplanan  $P_s$  ve  $Q_s$  değerleri karşılaştırılır. Hata tolerans değerleri içinde ise makine iterasyonu sonlandırılır. Eğer hata, tolerans değerleri dışında ise en son hesaplanan rotor negatif sıra aktif gücüne ( $P_{rn}$ ) göre rotor pozitif sıra aktif gücü ( $P_{rp}$ ) güncellenir,  $V_{rp}$  ve  $I_{rn}$  değerlerinin hesaplandığı adıma geri dönlür. Stator tarafı gerilim ve güç değerleri ile asenkron generatör terminalinden sisteme enjekte edilen stator akımları belirlenir. Dengesiz yük akışı iterasyonunda bu akım değerleri

kullanılarak bara gerilimleri yeniden hesaplanır. İki iterasyon bloğu arasındaki veri akışı Şekil 1'de 2 numara ile gösterilmiştir. Eğer dengesiz güç akışı iterasyonu yakınsıyorsa program sonlandırılır.



Şekil 1: Önerilen modelin yük akışı analizine dâhil edilmesine ilişkin akış diyagramı

### 3. TEST SİSTEMİ

Geliştirilen model, IEEE tarafından hazırlanan 34 baralı radyal dağıtım test sistemine [5] uygulanmıştır. Bu sistemden farklı olarak, asenkron generatörler için test sistemi oluşturmak amacıyla iki baraya servis trafosu ile birlikte iki generatör ilave edilmiştir. Bu test sistemine ait tek hat şeması Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'de 848 ve 890 numaralı baralarda servis transformatörleri ve sonrasında rüzgâr türbinleri görülmektedir. 34 baralı radyal test sisteminde G1 ve G2 baralarına bağlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinin çıkış gücü 660 kW olarak kabul edilmiştir. Her iki rüzgâr türbininde kullanılan asenkron makinenin etiket değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: 34 baralı test sisteminde kullanılan asenkron generatörlere ait parametreler

AnmaGücü	660 kW
Anma Gerilimi	480 V
Rs (Ω)	0,0018501
Xs (Ω)	0,037006
Rr (Ω)	0,0024436
Xr (Ω)	0,04189
Xm (Ω)	1,39636

### 4. YÜK AKIŞI ANALİZ SONUÇLARI

İncelenen 4 model için 34 baralı radyal dağıtım test sisteminde yük akışı analizi yapılmıştır. [5]'de verilen bara gerilim genlikleri referans alınarak ilgili baralar için modellerin hata oranları hesaplanmış ve bu oranlar A fazı için Tablo 2'de, B fazı için Tablo 3'te, C fazı için Tablo 4'te C fazı için modellere ait hata oranlarının genel olarak %0,88'i geçmediği görülmektedir. Ayrıca, C fazı için en büyük hata oranı Model 1 için %0,18, Model 2 için %0,27, Model 3 için %0,88 ve Model 4 için %0,45 değerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 4'te verilmiştir. A, B ve C fazları için Tablo 2 - Tablo 4'te C fazı için modellere ait hata oranlarının genel olarak %0,88'i geçmediği görülmektedir. Ayrıca, C fazı için en büyük hata oranı Model 1 için %0,18, Model 2 için %0,27, Model 3 için %0,88 ve Model 4 için %0,45 değerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 4'te yer alan baraların haricindeki baralara ait gerilim değerlerine [5]'de yer verilmemiştir. Bu sebeple diğer baralara ait faz gerilim hata oranları ile ilgili kıyaslamalar yapılamamıştır.

Tablo 2'den A fazı için modellere ait hata oranlarının genel olarak %2'yi geçmediği görülmektedir. Ayrıca, A fazı için en büyük hata oranı Model 1 için %0,24, Model 2 için %0,27, Model 3 için %1,06 ve Model 4 için %1,26 değerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 2: A fazı gerilim genliklerinin hata oranları

Bara No	Bara İsmi	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
2	802	%0,01	%0,01	%0,02	%0,02
4	808	%0,01	%0,01	%0,06	%0,07
7	814	%0,00	%0,05	%0,17	%0,19
8	850	%0,00	%0,05	%0,17	%0,20
9	816	%0,00	%0,06	%0,17	%0,19
12	822	%0,00	%0,05	%0,18	%0,20
13	824	%0,00	%0,06	%0,19	%0,22
17	854	%0,01	%0,09	%0,23	%0,26
18	852	%0,03	%0,12	%0,30	%0,34
20	832	%0,03	%0,13	%0,29	%0,33
21	858	%0,04	%0,13	%0,30	%0,34
23	890	%0,13	%0,14	%0,88	%1,03
24	864	%0,18	%0,27	%0,16	%0,19
25	834	%0,04	%0,13	%0,30	%0,34
29	848	%0,04	%0,14	%0,31	%0,35
32	840	%0,03	%0,13	%0,31	%0,35
35	G1	%0,02	%0,11	%0,41	%0,45
36	G2	%0,24	%0,10	%1,06	%1,26

Tablo 3'te B fazı için modellere ait hata oranlarının genel olarak %0,42'yi geçmediği görülmektedir. Ayrıca, B fazı için en büyük hata oranı Model 1 için %0,42, Model 2 için %0,10, Model 3 için %0,11 ve Model 4 için %0,32 değerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 3: B fazı gerilim genliklerinin hata oranları

Bara No	Bara İsmi	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
1	800	%0,01	%0,01	%0,01	%0,01
2	802	%0,01	%0,01	%0,01	%0,01
4	808	%0,03	%0,02	%0,02	%0,02
5	810	%0,04	%0,02	%0,02	%0,03
7	814	%0,08	%0,03	%0,04	%0,06
8	850	%0,09	%0,04	%0,04	%0,06
9	816	%0,08	%0,04	%0,04	%0,06
13	824	%0,09	%0,04	%0,04	%0,06
14	826	%0,09	%0,04	%0,04	%0,06
17	854	%0,10	%0,03	%0,03	%0,06
18	852	%0,12	%0,04	%0,03	%0,07
19	856	%0,10	%0,04	%0,03	%0,06
20	832	%0,12	%0,04	%0,03	%0,07
21	858	%0,12	%0,04	%0,03	%0,07
23	890	%0,32	%0,05	%0,04	%0,21
25	834	%0,13	%0,04	%0,03	%0,07
29	848	%0,12	%0,04	%0,02	%0,06
31	836	%0,03	%0,06	%0,07	%0,03
32	840	%0,02	%0,06	%0,07	%0,03
34	838	%0,13	%0,04	%0,03	%0,07
35	G1	%0,17	%0,06	%0,11	%0,15
36	G2	%0,42	%0,10	%0,11	%0,32

Tablo 4'te C fazı için modellere ait hata oranlarının genel olarak %0,88'i geçmediği görülmektedir. Ayrıca, C fazı için en büyük hata oranı Model 1 için %0,18, Model 2 için %0,27, Model 3 için %0,88 ve Model 4 için %0,45 değerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 4: C fazı gerilim genliklerinin hata oranları

Bara No	Bara İsmi	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
1	802	%0,01	%0,01	%0,02	%0,02
2	808	%0,01	%0,01	%0,06	%0,07
7	814	%0,00	%0,05	%0,17	%0,19
8	850	%0,00	%0,05	%0,17	%0,20
9	816	%0,00	%0,06	%0,17	%0,19
13	822	%0,00	%0,05	%0,18	%0,20
17	824	%0,00	%0,06	%0,19	%0,22
18	854	%0,01	%0,09	%0,23	%0,26
20	852	%0,03	%0,12	%0,30	%0,34
21	832	%0,03	%0,13	%0,29	%0,33
23	858	%0,04	%0,13	%0,30	%0,34
25	890	%0,13	%0,14	%0,88	%1,03
29	864	%0,18	%0,27	%0,16	%0,19
31	834	%0,04	%0,13	%0,30	%0,34
32	848	%0,04	%0,14	%0,31	%0,35
35	840	%0,03	%0,13	%0,31	%0,35
36	G1	%0,02	%0,11	%0,41	%0,45

## 5. YÜK AKIŞI ANALİZLERİNDE MODELLERİN İTERASYON VE İŞLEM SAYILARI BAKIMINDAN İNCELENMESİ

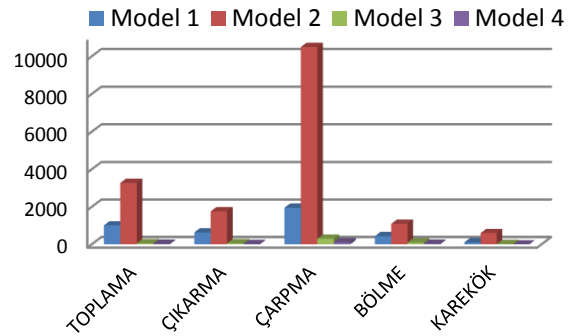
Modellerin 34 baralı test sisteminde yük akışı uygulamasında, iterasyon sayısı ve işlem karmaşıklığı bakımından incelenmesi bu kısımda yapılmıştır.

Tablo 5'te modellerin uyarlandığı yük akışı analizinde iterasyon sayıları iki farklı açıdan ele alınmıştır. Bunlardan birincisi genel iterasyon sayısı, diğeri ise azami makine iterasyonu sayısıdır. Genel iterasyon sayısı yük akışı çözümüne ulaşılabilmesi (yük akışı çözümünde yakınsama kriterinin sağlanabilmesi) için gerekli iterasyon sayısını, makine iterasyonu ise yük akışı iterasyonu içerisinde makineye ait çözümün yakınsama kriterini sağlaması için gerekli olan iterasyon sayısını temsil etmektedir. Azami makine iterasyonu sayısı, yük akışı iterasyonları içerisinde gerçekleşen maksimum makine iterasyonu sayısını göstermektedir. Tablo 5'te verilen iterasyon sayılarına bakıldığında Model 1 için 11, Model 2 için 12, Model 3 için 10 ve Model 4 için 9 iterasyonda analiz sonlandırılmıştır. Azami makine iterasyonu sayısı Model 1'de 1 ve Model 2'de 6 iterasyondur. Model 3 ve Model 4 ise karmaşık matematiksel işlemler gerektirmeyen ve iterasyonsuz ilkel modellerdir.

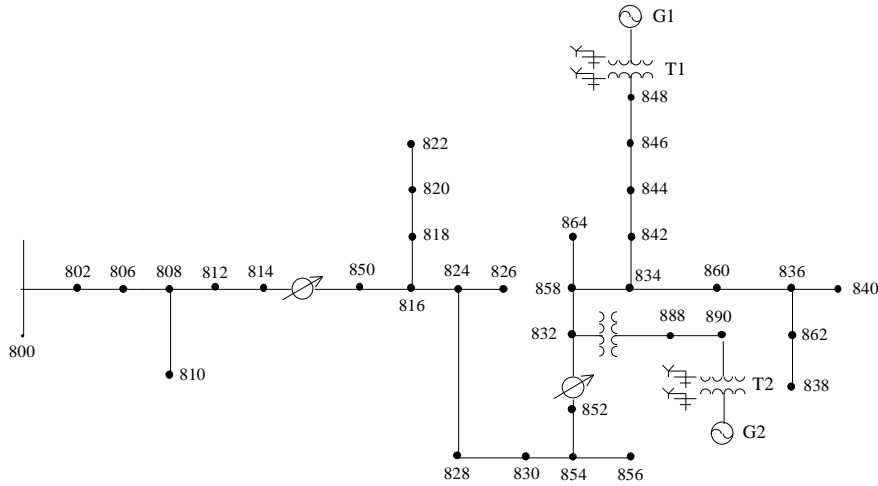
Tablo 5: Modellerin 34 baralı sistem için iterasyon sayıları

Model 1		Model 2		Model 3		Model 4	
Genel İterasyon	Azami Makine İterasyonu	Genel İterasyon	Azami Makine İterasyonu	Genel İterasyon	Azami Makine İterasyonu	Genel İterasyon	Azami Makine İterasyonu
11	1	12	6	10	-	9	-

Diğer taraftan, Şekil 2'te sunulan sonuçlara göre; 34 baralı test sisteminde yük akışı için Model 2'nin diğer modellerle karşılaştırıldığında daha fazla toplama, çıkarma, çarpma, bölme ve karekök alma işlemi gerektirdiği anlaşılmaktadır. Model 2'den sonra en fazla işlem gerektiren model ise model 1'dir. Model 3 ve model 4 ise beklenildiği gibi diğer iki modele göre daha az işlem gerektirmektedir.



Şekil 2: 34 baralı sistemde yük akışı analizinde modeller için icra edilen işlem sayıları



Şekil 3: Rüzgâr türbinlerinin yerleştirildiği 34 baralı radyal test sistemi [5]

## 6. SONUÇ

Bu çalışmanın birinci kısmında, şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlü rüzgar türbini için önerilen modelin yük akışına dahil edilmesi için oluşturulan algoritma sunulmuştur. Algoritmada dengesiz yük akışı analizi süpürme prensibine dayalı gerçekleştirilmiştir.

Daha sonra önerilen model ve literatürdeki muadil modeller (kayma hesabı temelli fazör tanım bölgesi model, Sabit P,Q model ve Sabit P-Q(V+) model) IEEE 34 baralı dengesiz radyal dağıtım test sisteminde yük akışına uygulanmıştır.

Yük akışı analiz sonuçlarından bara gerilimlerinin hesabında, önerilen model ve kayma hesabı temelli fazör tanım bölgesi modelin, Sabit P,Q model ve Sabit P-Q(V+) modele göre daha doğru sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Diğer taraftan, modeller iterasyon sayısı ve işlem karmaşıklığı bakımından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadan, önerilen modelin kayma hesabı temelli fazör tanım bölgesi modele göre yük akışı uygulamasında daha az iterasyon ve işlem sayısı gerektirdiği sonucuna varılmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen "Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin Dengesiz Gerilim Altında Dağıtım Sistemlerinde Yük Akışı için Modellenmesi (Proje No:112E222)" isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] Köksoy A., Öztürk O., Balcı M. E., Hocaoglu M. H., Dursun B., " Dengesiz Güç Akışı Analizleri için Sabit Hızlı Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbini Modeli Bölüm 1:Generatör Modeli", EVK 2015, Sakarya.
- [2] Abdel-Akher M., Mahmoud K., "Unbalanced distribution power-flow model and analysis of wind turbine generating systems", Euro. Trans. Electr. Power, vol. 23, no. 5, pp. 689-700, Jul. 2013.
- [3] Yang X., Wei Z., Sun G., Sun Y., Yuan Y., Lu Z., Xu X., Huang L., "Power flow calculation for unbalanced three-phase distribution network with DGs based on

phase-sequence hybrid modeling", IEEE SEGE 2013, pp.1-6, 28-30 Aug. 2013.

- [4] Moghaddas-Tafreshi S. M., Mashhour E., "Distributed generation modeling for power flow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial distribution systems considering distributed generation", Elect. Power Syst. Res., vol. 79, no. 4, pp.680-686, Apr. 2009.
- [5] IEEE Power & Energy Society "34-bus Feeder (XLS and DOC)" <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/tstfeeders/feeder34.zip> Son erişim tarihi: 01 Ağustos 2014.
- [6] Dugan R., "Reference Guide. The Open Distribution Simulator (OpenDSS)", EPRI, July 2010.
- [7] Mathworks, "Matlab Software documentation", <http://www.mathworks.com/help/matlab/language-fundamentals.html>, en son erişim tarihi: 1 Mart 2015.
- [8] Eminoglu U., Hocaoglu M. H., "Distribution systems forward/backward sweep-based power flow algorithms: a review and comparison study", Electric Power Components and Systems, vol. 37, no. 1, pp. 91-110, May. 2008.