

TÜBİTAK MARMARA ARAŞTIRMA MERKEZİ ENERJİ ENSTİTÜSÜ RÜZGÂR ENERJİSİ ÇALIŞMA ALANLARI VE MİLRES PROJESİ

Şeref Naci ENGİN¹

ÖZET

Bu bildiride Kocaeli Gebze'de TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) bünyesinde yer alan Enerji Enstitüsü'nde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından özellikle Rüzgâr Enerjisi alanında yapılmakta olan ve yapılabilecek çalışma konuları sunulmuştur. Kurulduğu ilk yıllarda Enerji Sistemleri Bölümü, 1996 yılı başlarında Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü (ESÇAE) ve nihayet 3 Ekim 2004 tarihinden itibaren Enerji Enstitü (EE) olarak faaliyetlerini sürdüren kurumumuz sahip olduğu değerli insan kaynağı ve güçlü altyapısıyla enerji alanında önemli ulusal ve uluslararası projelere imza atmıştır. Rüzgâr Enerji Sistemleriyle ilgili çalışmalar MAM EE Güç Elektroniği ve Kontrol Teknolojileri Stratejik İş Birimi bünyesinde yürütülmekte olduğundan, Güç Elektroniği çalışma grubunun sahip olduğu uzmanlık alanları yapılan projelerle birlikte kısaca tanıtılmıştır. Bu bağlamda ülkemizde Rüzgâr Enerji Sistemleri alanında başlatılan geniş katılımlı ilk büyük proje olan Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi (MİLRES) projesi özetlenmiş ve MAM Enerji Enstitüsü olarak bu projede üstlenilmiş İş Paketlerinde icra edilmekte olan çalışmalara yer verilmiştir. Ayrıca yine bu alanda veya bu alanı destekler mahiyette kurumumuzda yürütülen küçük güçlü rüzgâr türbini geliştirme, mikro konuşlandırma, rüzgâr hızı kestirimi ve diğer ilgili faaliyetler özetlenmiştir. Bütün bu çalışmaların altyapısını oluşturan kısa bilgilendirme notları sunulmaktadır sempozyum katılımcılarına daha yararlı hale getirilmesine çalışılmıştır.

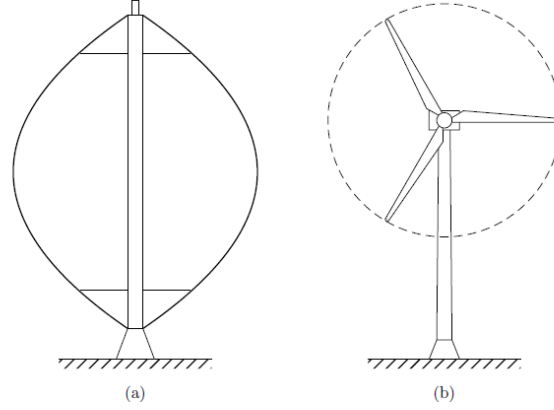
1. GİRİŞ

Rüzgâr Enerjisi insanoğlunun tarihin ilk çağlarından beri farkında olduğu ve yararlanmaya çalıştığı bir enerji türüdür. İnsanoğlu doğrudan kullanılabilen bu büyük güçten en iyi biçimde yararlanmaya çalışarak açık denizlere açılabilen için yelkenli gemiler yapmış, tabii vantilasyon yöntemleriyle yaşadığı mekânları iklimlendirmiş, hatta daha ileriki dönemlerde rüzgâr gücünü mekanik güce dönüştürmeyi başararak tahıl öğütmek için yel değirmenleri inşa etmiş, kuyu veya diğer su kaynaklarından su çekmek için rüzgâr pompaları imal etmiştir. Günümüzde Rüzgâr veya Yel Değirmenlerine benzer yapılar rüzgâr gücünü elektrik enerjisine dönüştüren Rüzgâr Türbinleri olarak karşımıza çıkmaktadırlar.

Temel olarak dikey eksenli (rüzgârın hava direnci –drag– kuvvetinden yararlandığından daha ziyade düşük güçler için söz konusudur) ve yatay eksenli (kanat profiline kazandırdığı aerodinamikle havanın kaldırma –lift– kuvvetinden faydalandığından yüksek güçler elde edilebilmektedir) olarak tasarlanıp imal edilen rüzgâr türbinleri birkaç kilovat (kW) mertebelerinden 10 megavat (MW) mertebelerine kadar elektrik gücü üretebilmektedirler. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin en başarılı örneği **Şekil 1(a)**'da görünen Darrieus tipi rüzgâr türbinidir. Bu tip rüzgâr türbinlerinin en önemli özelliği hâkim rüzgâr yönüne döndürülmesine gerek olmamasıdır. Bu özellik rüzgâr esiş yönünün sıkça değiştiği yerler için büyük yarar sağlar. Dikey eksenli olmaları sebebiyle generatör ve dişli aktarma elemanlarının yerde konuşlandırılması bir diğer üstünlükleridir. Bu tip rüzgâr türbinlerinde düşük hızda

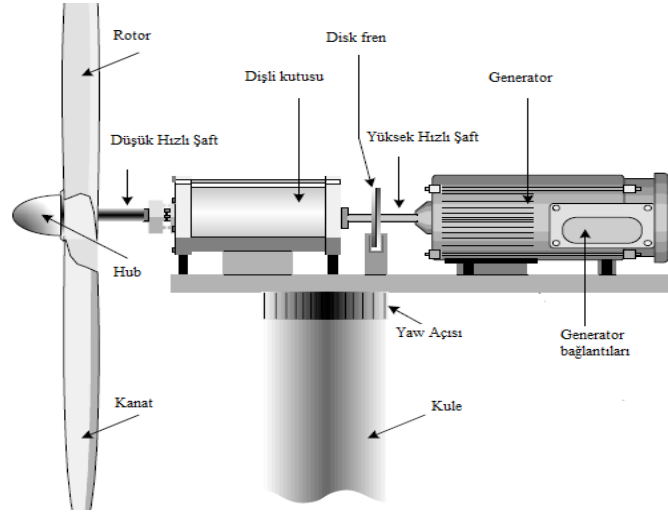
¹ TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü

çalıştıklarından yüksek momentler söz konusu olduğundan aktarma organları (drive train) yüksek maliyetlidir ve bakımları kolay değildir. Bu yüzden kullanımları son yıllarda oldukça düşmüştür. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri yüksek rüzgâr hızlarından etkin biçimde yararlandıklarından ve türbülansın daha az etkilendiklerinden dolayı çok daha fazla tercih edilmeye başlamıştır. Yatay eksenli türbinler **Şekil 1(b)**'de görüldüğü gibi üç kanatlı veya iki kanatlıdır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde rotor eksenini yönlendirme kontrol (yaw control) mekanizmasıyla hâkim rüzgâr yönüne göre değiştirilerek her yönden esen rüzgârla çalıştırılabilirler.



Şekil 1. Dikey Eksenli (a) ve Yatay Eksenli rüzgâr türbinleri (b).

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri aerodinamik alt sistem, dişli ve aktarma kutusu, generatör, kontrolör, kule ve elektrik bağlantı alt sistemlerinden oluşur. **Şekil 2**'de tipik bir yatay eksenli rüzgâr türbininin yapısı resmedilmiştir.



Şekil 2. Yatay eksenli rüzgâr türbini genel gösterimi

Aerodinamik alt sistem kanatlar ve kanatların birleştiği göbekten (hub) oluşan türbin rotorundan meydana gelir. Dişli ve aktarma kutusu düşük hızlı şaft (kanat tarafı), yüksek hızlı şaft (generatör tarafı), bunlar arasındaki dişli kutusu ve frenlerden oluşur. Generatör, yüksek hızlı şafta bağlı aerodinamik momenti elektrik enerjisine çeviren elektrik makinesidir. Kule rüzgâr türbini rotor eksenine dik, rüzgâr türbini alt sistemlerini taşıyan boru veya kafes direkt olarak oluşur. Kule üzerinde "nacelle" denilen dişli kutusu ve generatörü içine alan "makine dairesini" döndürmeye yarayan bir dişli mekanizması vardır. Yukarıda da bahsedildiği gibi, türbini kendi etrafında döndürerek rüzgârı mümkün olduğunca tam karşıdan almaya yarayan bu mekanizmaya yönlendirme mekanizması veya sistemi

(yaw system) denir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde generatör çıkışındaki elektriği şebekeye bağlayan konvertör (elektriksel dönüştürücü) ve kontrolörlerden oluşan elektrik alt sistemleri mevcuttur. Bu konvertörler genellikle “back-to-back converter” olarak tasarlanmış olup ardı ardına AC-DC ve DC-AC dönüşümü yaparak generatörün ürettiği gerilimi şebekeye aktarırlar.

Birkaç megavat güç verebilen türbinler için dahi en az 40-45 m uzunluğunda kanat boyları, 80 m'den fazla kule yükseklikleri, 100 ton civarında kule üstüne yerleştirilen nasel'ler (makine daireleri) söz konusudur. Bu devasa yapıların güvenle ayakta durması için iyi bir zemin etüdü ve inşaat kalitesi gereklidir. Rüzgâr türbinlerinde esas olarak iki tür elektrik generatörü kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak bilineni Çift Beslemeli Asenkron Generatör (bilezikli asenkron generatör, kısaca DFIG), diğeri ise Sabit Mıknatıslı Senkron Generatördür (kısaca PMSG). Çift Beslemeli Asenkron Generatör anma (nominal) gücünü yüksek devirlerde verdiği için (tipik olarak 1.500 dev/dk), anma hızındaki rüzgârın düşük devirde (tipik olarak 25 dev/dk) döndürdüğü kanatların bu düşük devir sayısının büyük dönüştürme oranlı bir dişli kutusu yardımıyla yükseltilmesi gerekir (bu örnek için $25/1500 = 1/60$). 2MW gücünde örnek bir türbine ait temel veriler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Tipik 2MW gücünde bir rüzgâr türbinine ait veriler.

Temel Veriler:	Türbin tipi	Yatay eksenli, rüzgârı önden alan (upwind)
	Anma gücü	2 MW
	Hız kontrolü	Her bir kanat açısı (pitch) kontrollü ve yedekli
	Uygun rüzgâr sınıfı	IEC 2a
	Devreye girme rüzgâr hızı (cut-in wind speed)	3.5 m/s
	Anma rüzgâr hızı	13.5 m/s
	Devreden çıkma rüzgâr hızı (cut-out wind speed)	25 m/s
	Çalışma ömrü	20 yıl
	İşletme ortam sıcaklığı	-20 ila +40 °C
Rotor verileri:	Rotor çapı	80 m
	Kanat sayısı	3 adet
	Taranan alan (rotor alanı)	5027 m ²
	Göbek (hub) yüksekliği	75 m
	Rotor toplam ağırlığı	40 ton
	Rotor (pervane tarafı) anma hızı	20 dev/dk
	Rotor çalışma hız aralığı	10-24 dev/dk
	Eğim (tilt) açısı	5°
	Konik açı	-2°
	Maks. kanat eni	3.250 m
	Kanat ağırlığı	7.100 kg/adet
	Kanat freni	Maks. kanat açısı ayarıyla
	Nasel Verileri:	Dişli kutusu
Generatör tipi		Çift Beslemeli Asenkron Generatör (DFIG)
Anma gerilimi ve devir sayısı		690 V AC, 1500 dev/dk
Frekans		50 Hz
Kontrol sistemi:	Kanat açısı (pitch) kontrol	Mikroişlemci temelli, gelişmiş kontrol algoritmali, bağımsız kanat ayarlamalı, “failsafe” (UPS yedeklemeli) frenleme
	Yön (yaw) kontrol	Mikroişlemci temelli, PID kontrol algoritmali
	SCADA	Modem Ethernet ve fiber temelli uzaktan erişim, izleme, raporlama ve kontrol
Kule:	Kule tipi	Konik çelik kule
	Kule yüksekliği	80 m
	Parça sayısı	3

Uzun yıllardır iyi bilinen iki elektrik makinesi tipi, temel olarak Asenkron Generatör ve Senkron Generatör, yarı-iletken teknolojisindeki gelişmelerle güç elektroniği ve kontrol imkânlarının iyileşmesi, sabit mıknatıs üretim ve makineye montaj tekniklerinin ilerlemesi, bilgisayar destekli karmaşık tasarım ve analiz yöntemlerinin kullanılabilmesi ve böylece yeni generatör mimarilerinin tasarlanması ve sair gelişmeler sayesinde yeni başarılı uygulamalarla karşımıza çıkmaktadır. Bu başarılı uygulamalar neticesi, rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında “enerji geri dönüşü”, “mâliyet” ve “uygulanabilirlik” kıstaslarıyla değerlendirildiğinde diğer kaynaklardan üstün hale gelmektedir. Bu nedenle yenilenebilir kaynaklar arasında rüzgâr enerjisi, hidrolik enerjiden sonra ikinci sıraya oturmuştur.

2. MİLRES Projesi

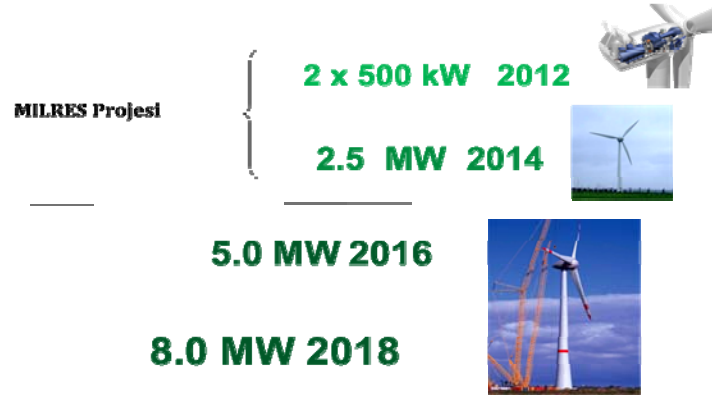
Ülkemizde gelişen elektromekanik, imalat ve inşaat sanayileri uluslararası pazarlarda yüksek rekabet gücüne sahip oldukları halde bu sanayilerin bir çeşit entegrasyonu sayılabilecek rüzgâr türbinleri teknolojisinde tam bir dışa bağımlılık söz konusudur. Üstelik tamamıyla yurtdışından ithalat yoluyla gelen rüzgâr türbinlerinin ülkemiz rüzgâr rejimine ve iklim şartlarına uygunlukları sınırlıdır, verim problemleri ve ciddi işletme zorlukları söz konusudur. Rüzgâr teknolojisindeki bu aşırı dışa bağımlılık önemli bir milli gelir kaybına yol açmaktadır.

2 Kasım 2011 tarihi itibarıyla 662 sayılı Kanun Hükmünde Kararname ile kuruluşuna dair kanunun yürürlükten kaldırılmasıyla "Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü" haline getirilen Elektrik İşleri Etüt İdaresi, ülke olarak halen 2 GW civarında işletmeye alınmış toplam RES kurulu gücümüzün önümüzdeki 10 yılda, Cumhuriyetimizin 100. yılı olan 2023’de, 20 GW olacağını öngörmektedir. 20 yıllık dönemde bu rakamın 40 GW olması beklenmektedir. Şu anda orta ve büyük ölçekli (500 kW ve üstü) endüstriyel rüzgâr türbinlerinin maalesef tamamı ithal edilmektedir. MW başına 1.5 milyon Amerikan doları (USD) piyasa değerinden hesaplırsak 20 yıl içinde rüzgâr türbinleri için yurt dışına akacak milli kaynağın 60 milyar USD civarında olacağı beklenmelidir. Ülkemiz rüzgâr sınıfına uygun, özgün ve ulusal rüzgâr türbin tasarımları geliştirilerek 20 yıl içinde iç pazarın hiç değilse %25’inin yerli üretim olması ve dolayısıyla 15 milyar USD milli kaynağın yurtdışına akmasının önlenmesi hedeflenmelidir.

Bu düşünceyle çeşitli üniversiteler, araştırma kurumları ve özel sektörden firmaların oluşturduğu ülke çapında büyük bir konsorsiyum kurularak “**Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi - MİLRES**” başlıklı bir Ar-Ge ve uygulama projesi hazırlanmıştır. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı için yapılacak olan bu TUBİTAK projesi için beş yürütücü kurum ortaklığı kurulmuştur:

- Sabancı Üniversitesi,
- Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ/TAI),
- İstanbul Ulaşım A.Ş.,
- TUBİTAK MAM Enerji Enstitüsü ve
- İstanbul Teknik Üniversitesi.

Bu beş yürütücü kurumun yönetiminde çalışan GYTE, YTÜ ve KOÜ (Kocaeli Üniversitesi) gibi başka üniversiteler ile imalatçı ve mühendislik firmaları bulunmaktadır. Endüstriyel ölçekli büyük rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi ve yerli imkânlarla imalatının gerçekleştirilmesi için başlatılacak proje ile ilk aşamada 500 kW’lık rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi ve bu prototipler deneme amaçlı kullanılarak tasarımları olgunlaştırıldıktan sonra 2.5 MW’lık türbin prototipinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. **Şekil 3**’de MİLRES projesi ve sonrası hedefler tasvir edilmiştir. Projede geliştirilecek tasarımlar özgün olup bu tasarımlardan uygulamaya uygun olanlar bilimsel analizler ve prototip testleri ile belirlenecektir. Denemeleri başarıyla geçen tasarımlar 2.5 MW’lık türbin sistemlerine aktarılacaktır. Proje kapsamında hazır alınacak bazı alt sistemler (frenler, hidrolik ekipman, asansör, trafo, kaplin vb) dışında kule dâhil bütün ana bileşenler (kanatlar, göbek, dişli kutusu, generatör, evirici, makine dairesi vb) kurulan ekibin çalışmalarıyla geliştirilecek olup tamamen özgün tasarımlar olacaktır. Ortaya çıkacak tasarımlar olabildiğince yerli imkânlarla seri imalata geçirilebilecektir.



Şekil 3. Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi (MİLRES) projesinin hedefleri

Ülke olarak henüz başlangıç seviyesinde bulunduğumuz rüzgâr enerjisi teknolojilerinde tamamıyla yerli rüzgâr enerji santralleri geliştirmek ve kurmak gibi büyük bir hedefi olan böylesi projelerin gerçekleşmesinde devlet desteği kaçınılmaz olmaktadır. Nitekim Almanya hükümetinin ülkedeki rüzgâr teknolojilerini olgunlaştırmak amacıyla 2 MW'lık bir prototip geliştirilmesi için 110 milyon Mark harcadığı bilinmektedir. Benzer bir düşünceyle MİLRES Projesi kapsamında kurulan çok ortaklı konsorsiyum vasıtasıyla ağırlıklı olarak dışa bağımlı olduğumuz enerji sektöründe yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarımızın değerlendirilmesi ve dahası teknolojide dışa bağımlılığımız azaltılarak bu alandaki yeteneklerimizin yaygınlaştırılmasına yönelik büyük bir atılım yapılmış olacaktır. Rüzgâr teknolojilerinin ülkemiz rüzgâr koşulları da dikkate alınarak gelişimi sağlanacak, bu sayede istihdam ve iş alanları oluşturularak enerji sektörümüzün ve bağlı birçok alt imalat sanayimizin gelişimi temin edilecektir.

3. TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü'nün Rüzgâr Enerji Sistemleriyle İlgili Yetenekleri

TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü'nde rüzgâr enerji sistemleriyle ilgili çalışmalar Güç Elektroniği ve Kontrol Teknolojileri Stratejik İş Birimi bünyesinde yürütülmektedir. Güç Elektroniği ve Kontrol Teknolojileri araştırma grupları sahip olduğu zengin insan kaynağı ve fiziki altyapısı ile yenilenebilir enerji sistem geliştirme ve örnek uygulamalar yapmak amacıyla yürüttüğü çalışmalarla önemli deneyimler kazanmıştır. MİLRES Projesinde Elektrik Sistemleri Ana İş Paketi altında Generatör Tasarım ve İmalatı, Türbin SCADA ve Otomasyonu (Şebeke Tarafı Arayüzü ve Bağlantı Kontrolü ile Türbin Arayüzü ve Kontrolü), OG Şebeke Bağlantısı ile Koruma ve Topraklama iş paketlerinden sorumludur. TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü'nün MİLRES projesindeki bu sorumluluklarının yanı sıra Rüzgâr Enerjisi alanında yapmakta olduğu ve yapabileceği çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

- Güç Elektroniği Sistemleri Tasarımı ve Prototip Üretimi (1 MW'a kadar AC-DC çeviriciler geliştirilmiş, şebeke bağlantılı DC-AC çeviriciler endüstride hizmete sokulmuştur)
- Generatör Tasarımı, Prototip Üretimi (500kVA'ya kadar PMSG ve DFIG tasarım, analiz ve imalatı hedefli çalışmalar sürmektedir)
- Generatör Sürücü Devreleri (30kW nominal, 75kW maks. güçlü sürücü devresi gerçekleştirilmiştir. Generatör sürücü testleri dinamometre üzerinde yapılmaktadır.)
- Şebeke Entegrasyonu ve Analizi (Yük Akışı Analizleri, Kısa Devre Analizleri, Kararlılık Analizleri, Harmonik Analizi, Fliker Analizi, vb. konularda önemli tecrübeye sahiptir)
- Şebeke Entegrasyonu, Dinamik Modelleme (Şebeke Bağlantı Kriterlerine Uygunluğun belirlenmesi için Statik ve Dinamik Modelleme, Simülasyon ve Analizler (Digsilent, PSCAD), Raporlamalar)
- SCADA ve Enerji Yönetimi Geliştirilmesi, Kurulması (rüzgâr türbinleri ve çiftlikleri için uzaktan izleme ve kontrol amaçlı özel SCADA ve RTU yazılımları ve donanımları geliştirilmesi)
- Ölçüm ve Raporlama Çalışmaları (uzaktan izlenebilir ölçüm sistemleri geliştirip kurarak)
- Frenleme, Kanat, Nasel, Dişli Kutusu (mekanik ve kontrol sistemleri yapısal tasarım, analiz ve testleri)

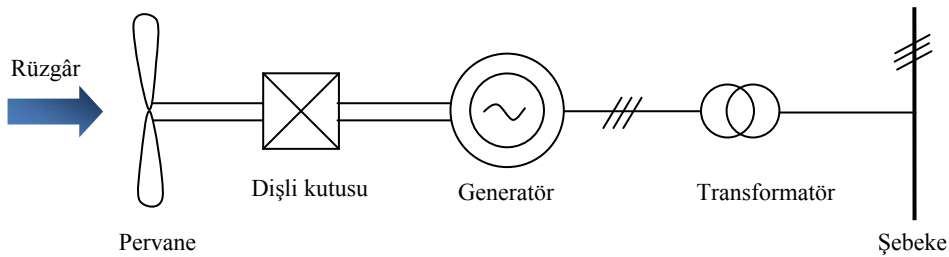
- RES projelerinde bağımsız kuruluş olarak fizibilite raporları hazırlanması, enerji yatırımcılarına projelerinin yapılabiliği hakkında rapor hazırlanması)
- Gelişmiş ticari yazılımlar kullanarak mikrokonuşlandırma çalışmaları
- Etkin bir enerji arz güvenliği teminine yönelik istatistiksel ve özbağlanımlı (otoregresif) model gibi gelişmiş yöntemlerle rüzgâr hız tahminleri gerçekleştirerek orta ve uzun vadeli (6-48 saat) rüzgâr enerjisi tahminleri

Yukarıda belirtildiği gibi TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü MİLRES projesine önemli katkılarda bulunacak beş yürütücü ortak kuruluştan birisidir. Aşağıda MİLRES projesinin ana iş paketleri (İP) ve sorumlu kurumlar listelenmiştir:

- **İP (1.0) Mekanik Sistemler: Sabancı Üniversitesi** (GYTE, YTÜ, İTÜ ve KOÜ'nden araştırmacılarla)
- **İP (2.0) Kanat Grubu: Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ/TAI)**
- **İP (3.0) Elektronik Sistemler: İstanbul Ulaşım A.Ş.** (İTÜ Kontrol Mühendisliği ile birlikte)
- **İP (4.0) Elektrik Sistemler: TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü** (YTÜ ve İTÜ'den araştırmacılarla)
- **İP (5.0) Rüzgâr Analizi ve Yapı Sistemleri: İstanbul Teknik Üniversitesi** (YTÜ'den araştırmacılarla)

Sabancı Üniversitesi yönetimindeki **Mekanik Sistemler Grubu** iş paketleri Proje Yönetimi, Sistem Modelleme, Makine Kutusu (Nacelle) Taşıyıcı İskeleti, Güç Aktarma Sistemi (rotor göbeği (hub), şaftı ve yatakları, kavrama ve darbe emici sistemler), Fren Sistemleri, Dişli Kutusu gibi iş paketlerinden oluşmaktadır. Temel olarak aerodinamik ve yapısal tasarım ve analiz çalışmalarını içeren **TUSAŞ** yürütücülüğündeki **Kanat Grubu**, Kanat Tasarım, Üretim, Test ve Yapısal Sağlık iş paketlerinden oluşmaktadır. **İstanbul Ulaşım AŞ** yürütücülüğündeki **Elektronik Sistemler Grubu** esas olarak güç elektroniği ve kontrol iş paketlerinden sorumludur. Generatör çıkışının kontrolünü ve şebekeyi beslemesini sağlayan “back-to-back converter” olarak bilinen doğrultucu ve evirici katlarının tasarım ve imalatı ile kanat ve yönlendirme (“pitch” ve “yaw”) kontrolleri bu grubun sorumluluğunda yapılacak işler arasındadır. **Enstitümüzce** (MAM EE) üstlenilen **Elektrik Sistemler Grubu** iş paketleri biraz daha tafsilatlı olarak aşağıda sunulduğundan son proje ortağı **İTÜ** yürütücülüğündeki **Rüzgâr Analizi ve Yapı Sistemleri Grubu** iş paketlerine bakacak olursak, grup isminden de anlaşılacağı üzere, bu grup iki ana bölümden oluşmaktadır: **1-Rüzgâr Analizi:** rüzgâr ölçümleri, “mikro-konuşlandırma” olarak adlandırılan yer seçimi, kısa süreli rüzgâr tahmini ve soğutma sistemi; **2-Yapı Sistemleri:** beton ve çelik kule sistemleri ile ilgili tasarım ve projelendirme işlerinden oluşmaktadır.

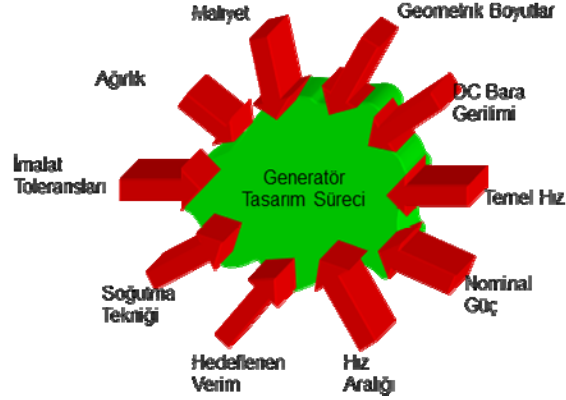
Enstitüsü (EE) olarak üstlenilen Elektrik Sistemleri ana iş paketi mekanik enerjinin (rüzgâr kuvvetiyle meydana gelen dönme enerjisinin) elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle ilgili başta generatör olmak üzere bütün elektromekanik aksam, kontrol-otomasyon-izleme sistemi, transformatör üzerinden şebeke bağlantısı, yıldırımdan koruma, topraklama ve diğer bütün elektrik tesisat işlerini kapsar. Elektrik sistemi, aktarma organlarından (drive train) hemen sonra rüzgâr türbinlerinin en temel bileşenlerini oluşturur. **Şekil 4**'te elektrik sistemi ve aktarma organlarının oluşturduğu bağlantı blok şeması olarak gösterilmiştir. MİLRES projesi çerçevesinde MAM EE olarak üstlendiğimiz iş paketlerinde yürütülmekte olan faaliyetlerle ilgili teorik altyapı oluşturacak bilgi notu aşağıdaki bölümde sunulmuştur.



Şekil 4. Bir rüzgâr türbininde elektro-mekanik bağlantının blok gösterimi

4. GENERATÖR TASARIM VE İMALATI

Generatör tasarım ve imalatında çok sayıda etken, kısıt ve değişken hesaba katılmalıdır. Bu süreçte hatırdan tutulması gereken ölçütler **Şekil 5**'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Generatör tasarım ve imalatına münhasır iş paketleri ve bu iş paketlerinin gerçekleştirilmesinde izlenmesi gereken adımlar aşağıda kısaca sunulmuştur.



Şekil 5. Generatör tasarım süreci

4.1. Generatör Tasarım ve İmalatı İş paketleri ve Tasarım Adımları

Generatör tasarım ve imalatında yapılacak işler ve izlenecek süreçler genel olarak aşağıdaki iş paketleri kapsamında gerçekleştirilir:

- Elektriksel-Manyetik Analiz ve Tasarımlar İş Paketi (İP)
- Mekanik Analiz ve Tasarımlar İP
- Dinamik Analiz ve Tasarımlar İP
- Termal Analiz ve Tasarımlar İP
- Prototip Generatör İmalatı İP
- Testler İP

Generatör tasarımı esas olarak beş temel tasarım ve imalat sürecinin birbirleri ile etkileşimini içermektedir. Tasarım çalışmalarında aşağıda verilen sıralama izlense bile bu tasarım adımlarının birbirini etkilediği unutulmamalıdır. Örneğin generatör mekanik tasarımı, tasarım adımı olarak üçüncü sıradadır, fakat tasarım sürecinde elektriksel ve manyetik tasarım, doğrudan mekanik tasarımı etkilediğinden ve mekanik tasarımın başlangıç girdilerini oluşturduğundan; aynı şekilde ısı (termal) tasarım ve dinamik tasarım da mekanik tasarım sonuçlarından etkilediğinden bu iteratif karakterli çalışmada tüm tasarımların toplamı generatör tasarımı oluşturur. Generatör mekanik tasarımı, verilen başlangıç koşulları ve tasarım limitleri (örnek olarak çalışma koşulları, hacim, ağırlık vb.) ile başlamaktadır. Elektriksel tasarım ve manyetik tasarım izlenecek tasarım yönteminde ilk adımlardır.

1. Elektriksel Tasarım
2. Manyetik Tasarım
3. Mekanik Tasarım
4. Isıl (Termal) Tasarım
5. Dinamik Tasarım

Belirlenen başlangıç şartları ve sınırlamalar (limitler) çerçevesinde, elektriksel tasarım FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi) tabanlı gelişmiş ticari yazılım programlarıyla ve kendi geliştirdiğimiz ve ayrıca hazır bir diğer ticari yazılımla yapılan analitik hesaplamalarla ilk iterasyonda yaklaşık olarak generatörün stator-rotor yapısı ile sarım modeli oluşturulur. Kutup sayısı, sabit mıknatıslı generatör

için mıknatıs kalınlığı, rotor ve stator boyutları yaklaşık olarak tespit edilir ve sargılar oluşturulur. Boyutlar belirlendikten sonra kullanılacak sac malzeme, mıknatıs seçilir, bobin kalınlığı ve sarım sayısı belirlenir. Belirlemede, ilk iterasyon olması sebebiyle, başlangıç koşulları (elde edilmek istenen güç) ve tasarım limitleri dikkate alınmaktadır. Sonraki iterasyonlarda, manyetik, elektriksel, termal ve dinamik tasarımlardan çıkan sonuçlar mekanik tasarımda tekrar girdi olarak kullanılır. Motor modelinin akım, ters EMK (back EMF), moment (tork) vb. benzetim (simülasyon) sonuçları elde edilir. İstenilen değerlerin sağlanamaması durumunda başlangıçta elektriksel tasarımda belirlenen parametreler değiştirilerek elektriksel tasarım tekrarlanır. Elektriksel tasarıma göre uygun model elde edilir, elde edilen stator ve rotor modelinin manyetik tasarımı yapılır. Manyetik akının motor içerisinde izleyeceği yol motor performansını etkileyen önemli bir etkidir. Manyetik alan dağılımı ve manyetik akı yönlerinin hesaplanmasında en çok kullanılan matematiksel yöntem sonlu elemanlar yöntemidir (FEM). Bu yöntem kullanılarak akı dağılımı net olarak görülebilmektedir. Motorda oluşacak moment dalgalanmaları hesaplanabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi sonucunda akının yüksek olduğu veya malzemenin manyetik doyuma gittiği kısımların olup olmadığı kontrol edilir; moment dalgalanmalarının istenilen limitler aralığında olup olmadığı sınıranır. Sonuçlara göre gerekli değişiklikler mekanik tasarımda yapılır, elektriksel tasarım ve manyetik tasarım tekrar edilir.

4.1.1. Elektriksel-Manyetik Analiz ve Tasarımlar

Yukarıda 4.1 alt bölümünde belirtildiği gibi elektriksel ve manyetik analiz ve tasarım çalışmalarında analitik ve FEM tabanlı hesaplama yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmalar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

Geliştirilen analitik model ile yapılan tasarım:

- Dış ve iç çapların belirlenmesi
- Mil çapının belirlenmesi
- Oluk boyutlarının ve sayısının belirlenmesi
- Eksensel uzunluğun belirlenmesi
- Hava aralığının belirlenmesi
- Malzeme türlerinin belirlenmesi: sac, çelik (ve senkron generatör için mıknatıs)
- Mıknatıs kalınlığının belirlenmesi (sabit mıknatıslı senkron generatör için)
- Sarım sayısının ve sargı kesitinin belirlenmesi
- Sarım şeklinin belirlenmesi

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) programları (2-D ve 3-D) kullanarak detaylı analiz ve tasarım sonucu:

- Dış ve iç çapların belirlenmesi
- Mil çapının belirlenmesi
- Oluk boyutlarının ve sayısının belirlenmesi
- Eksensel uzunluğun belirlenmesi
- Hava aralığının belirlenmesi
- Mıknatıs kalınlığının belirlenmesi (sabit mıknatıslı senkron generatör için)
- Sarım sayısının ve sargı kesitinin belirlenmesi
- Sarım şeklinin belirlenmesi
- Elektriksel yüklemenin belirlenmesi
- Manyetik yüklemenin belirlenmesi
- Dinamik FEA yazılımları ile maksimum *zıt emk* değerinin belirlenmesi
- Dinamik FEA yazılımları ile moment dalgalılığının belirlenmesi
- 3D FEA programları ile eksensel ve radyal kuvvetlerin, hava aralığına duyarlılığın belirlenmesi
- Moment ve gücün hıza bağlı değişim profillerinin elde edilmesi.
- Tasarım aralığındaki hız ve momentler için, nüve ve bakır kayıplarının kestirimi
- Tasarım aralığındaki hız ve momentler için, verim değerlerinin kestirimi.
- Kısa devre analizi.
- Demanyetizasyon analizi

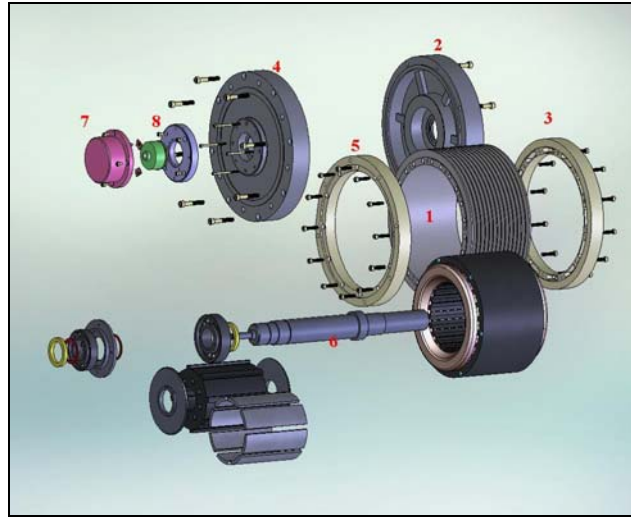
4.1.2. Mekanik Analiz ve Tasarımlar

Mekanik analiz ve tasarım iş paketinde yapılacak işler aşağıda sıralanmıştır. Tipik bir stator katı modeli **Şekil 6**'da sunulmuştur

- Stator ve sargı katı modelinin oluşturulması
- Rotor ve mıknatısların katı modelinin oluşturulması (asenكرون makine için sadece rotor modeli)
- Mil ve rulmanların katı modelinin oluşturulması
- Karkas, kapaklar, soğutma sistemi katı modelinin oluşturulması



Şekil 6. Örnek bir stator katı modeli



Şekil 7. Elektrik makinesi patlatılmış katı modeli

Generatör mekanik tasarımı; elektriksel tasarıma, manyetiksel tasarıma, ısı tasarıma ve dinamik tasarıma uygun modellerin imalat sürecinde yapılabilir katı modelinin oluşturulmasını içermektedir. Mekanik tasarımda izlenecek yöntem, elektrik makinesinin temel olarak dörde ayrılabilir olması ve dört bölümün katı modelinin çıkarılmasıdır.

Stator ve sargı katı modeli stator grubunu, rotor ve mıknatısların katı modeli rotor grubunu veya asenكرون makine için sadece rotor grubunu, mil ve rulmanlar mil grubunu, karkas (statoru tutan yapıdır), kapaklar, soğutma sistemi dış gövde grubunu oluşturmaktadır. **Şekil 7**'de tipik bir elektrik makinesine ait patlatılmış katı model çizilmiştir.

Stator katı modeli, stator saclarından stator paketinin oluşturulmasıdır. Stator saclarının üretim sürecinde eş merkezli birleştirilebilmesi için katı modelde merkezleme delikleri sac üzerinde bırakılır. Sac paketi, stator dış gövdesinde kama veya kaynak ile birleştirilir. Kama ile birleştirme yapılırsa, katı modelde sac üzerinde kama boşlukları bırakılır.

Sargı katı modeli, stator olukları içerisinde sarımın ve stator sac paketinden çıkan sarım uçlarının katı modelinin oluşturulmasıdır. Sargı katı modelinin oluşturulmasında, ısı analiz sırasında modelden faydalanmak ve elektrik makinesi içerisinde sarım uçlarının rulmanlara olan mesafesini katı model olarak görmek amaçlanmaktadır. Elektrik makinesi içerisinde hacim kontrolü yapılması açısından sarım uçlarının stator uçlarından dönüş yarıçapı, bağlantı şekli önem arz etmektedir.

Rotor katı modeli, rotor saclarından rotor paketinin oluşturulmasıdır. 500 KW ve 2.5 MW elektrik makinelerinin rotor sac paketi mil çap değerine kadar devam etmez. Rotorun tasarımında, mekanik olarak ağırlığında optimize edilmesi gerekir. Katı modelde rotoru mile bağlayan parça da modellenir.

Sürekli mıknatıslı motor mekanik tasarımda, yüzeye yerleştirilecek mıknatısların katı modeli oluşturulur. Rotor yüzeyi ile bağlantı şekli modellenir. Montaj sağlamlığı açısından geçmeli, kırlangıç veya “v” yapısı ile kısırılmalı olması tercih edilir.

4.1.3. Dinamik Analiz ve Tasarımlar

Dinamik analiz ve tasarımlar yapmaktaki amaç generatör mekanik parçalarının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, üç boyutlu mukavemet analizlerinin yapılması ve bu analizler sonucu mekanik parçaların boyutlandırılmasıdır. Bu kapsam yapılacak işler aşağıda sıralanmıştır:

- Generatörün dinamik analizinin yapılması
- Mil dinamik tasarımı ve mil malzemesinin belirlenmesi
- Mil dinamik analizi ve gerilmelerin elde edilmesi
- Mil ile yıldız parça arasındaki mekanik parçanın tasarımı ve analizi
- Yıldız parçanın dinamik tasarımı ve analizi
- Mıknatıslı rotor yüzeyine bağlayan mekanik bağlantının tasarımı ve dinamik analizi
- Stator ve karkas sisteminde kuvveti aktaran bağlantı elemanlarının tasarımı ve dinamik analizi

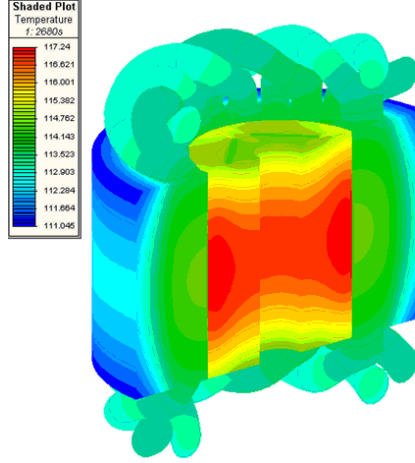
Milin ve rulmanların tasarımında, ağırlıklı olarak dinamik tasarım sonuçları belirleyici olur. Mil tasarımında, elektrik makinesi çalışma koşullarına göre oluşan burulma momenti, sistemde mil üzerine gelen rotor ağırlığı, merkezkaç kuvveti ile milin radyal doğrultusundaki kuvvetlerin, yataklardan gelen tepki kuvvetleri, oluşturduğu eğilme momenti dikkate alınır, bileşik zorlanma durumu mevcuttur. Rulman seçiminde, rulman üzerine gelen eksenel ve radyal kuvvet değerleri hesaplanır, rulman tipi ömür hesabına göre elde edilir. Isıl analizden hesaplanan yaklaşık elektrik makinesi mil sıcaklığı ve dolaylı olarak rulman sıcaklığı tahmin edilebilir. Yağ cinsi seçilir. Rulman katı modeli oluşturulur. Rulmanın mile geçme sıklığı, aktarılan moment değerine göre belirlenir.

Dış gövde grubu katı modeli; karkas, kapaklar, soğutma sisteminden oluşmaktadır. Karkas, statorun geçtiği şasidir, stator karkasa bağlanır ve karkas rüzgâr türbine içerisinde sabit bir yapıya bağlanır. Karkasın üzerinde, soğutma sistemi (radyatör) bulunabilir. Kapaklar, rulman yataklarının bulunduğu parçalardır. Bu parçalar, ısıl ve dinamik tasarım sonuçlarına göre boyutlandırılır ve katı modelleri oluşturulur.

4.1.4. Termal Analiz ve Tasarımlar

Elektrik makinesinin çalışması sırasında kayıp enerjiler oluşmakta ve bu enerji ısı olarak ortaya çıkmaktadır. Makinenin zarar görmeden çalışabilmesi için (özellikle sargı izolasyonları ve var ise mıknatısların) oluşan ısının elektrik makinesinden uzaklaştırılması gereklidir. Bu amaçla makine tasarımı sırasında ısıl analiz ve tasarımın da yapılması gereklidir. Bu çalışmalarda izlenecek adımlar aşağıda sıralanmış, örnek bir FEM tabanlı rotor ısıl analiz çıktısı **Şekil 8**'de sunulmuştur.

- Isıl kayıpların hesaplanması
- Soğutma sisteminin oluşturulması
- Soğutma sistemi parametrelerinin belirlenmesi (CFD Çalışmaları)
- Isıl modelin oluşturulması
- İki boyutlu ısı analizinin yapılması
- Üç boyutlu ısı analizinin yapılması
- Elektrik makinesi içerisinde stator, rotor, sargı, dış gövde sıcaklık değerlerinin elde edilmesi



Şekil 8. Stator ve rotor ısı analiz örneği

4.1.5. Prototip Generatör İmalatı

Elektrik makinesi imalatında ülkemizde oldukça yetkin birkaç fabrika bulunmaktadır. Bu fabrikalar sahip oldukları tecrübelerle çok çeşitli tip, güç ve boyutlarda elektrik makinesi, özellikle motor imal etmektedir. İmalat süreci genel olarak aşağıdaki gibi yol izlemektedir:

- Stator ve rotor sac malzemesinin temini ve sacın kestirilmesi
- Belirlenen hassasiyet durumuna göre sacın kesilme yönteminin belirlenmesi
- Stator ve rotor sac paketlerinin üretimi
- Stator ve rotor sarımlarının üretimi ve montajı
- Sürekli mıknatıslı senkron generatörde mıknatısların imalatı ve rotor üzerine yerleştirilmesi
- Milin işlenmesi
- Soğutma parçalarının imalatı
- Rotor yataklama elemanlarının temini ve imalatı
- Karkasın üretilmesi ve soğutma elemanlarının yerleştirilmesi
- Üretilen alt komponentlerin montajı

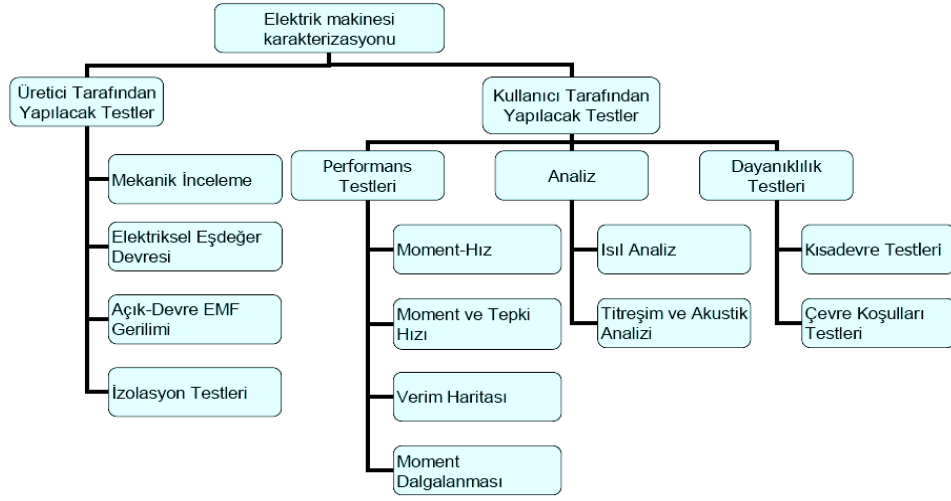
4.2. Testler

Üretilen generatörün (alternatörün) özelliklerinin belirlenmesinde imalatçının ve kullanıcının yapması gereken bir takım testler vardır. Bu süreç aşağıda bir çizelgeyle sunulmuştur, **Şekil 9**.

Yapılacak testler maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kısa devre testleri
- Yükleme testleri
- Demanyetizasyon testleri
- Termal testler
- Mekanik testler
- FMEA (Arıza ve Mod Etki Analizi) analizi
- Test sistemi için gerekli yüklerin seçimi ve alımı
- Yükleme oluşturacak elektrik motorunun ve sürücüsünün alımının yapılması
- Test sisteminin tasarımının yapılması, 3 boyutlu modellenmesi

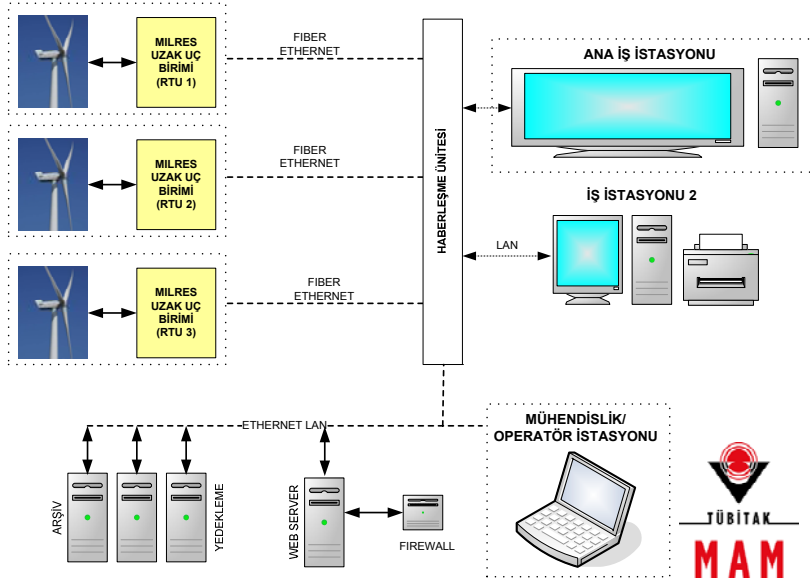
4.1 ve 4.2 bölümlerinde generatör tasarım, analiz ve imalat süreçleri detaya girmeden anlatıldıktan sonra aşağıda MAM EE'nün yürütücülüğünde yapılması gereken diğer iş paketleri tanıtılmıştır.



Şekil 9. Elektrik makinesi testleri

5. Rüzgâr Enerjisi Santrallerinde SCADA-Otomasyon Sistemleri

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition, Gözetimli Denetim ve Veri Toplama Sistemi) sistemleri işletilmekte olan süreçlere ilişkin verilerin toplanıp raporlanmasına ve değerlendirilmesine imkân sağlayabileceği gibi, rüzgâr türbinlerinin bulunduğu konumdan daha uzak bir noktadan izlenmesini de mümkün kılmaktadır. Uzaktan izleme altyapısında sistem güvenliğine azami önem verilerek ilgili güvenlik yazılım uygulamaları tasarlanması oldukça önemli olmakla birlikte, EPDK tarafından yayınlanan *Şebeke Yönetmeliği Ek-18* dokümanına uygun olarak çeşitli durum ve işletme bilgilerini içeren verilerin merkezi bir noktadan bilgisayar ortamında uzaktan izlenebilmesi, verilerin derlenmesi, depolanması ve raporlanması gerekmektedir. Şekil 10'da MİLRES projesi için önerilen SCADA sistemi genel yerleşim planı sunulmuştur.



Şekil 10. MİLRES için önerilen SCADA sistemi genel yerleşim planı

SCADA Sisteminin donanımsal ve yazılımsal olarak konfigürasyonu yapılırken kullanılacak olan donanımların ve arayüz yazılımlarının özellikleri toplanan veriler ve kontrol sinyalleri göz önüne alınarak belirlenmektedir.

5.1 SCADA Donanımları

SCADA donanımları; sunucu bilgisayarları, iş ve bakım-mühendislik istasyonları, yerel ağ donanımları, yazıcılar gibi raporlama gereçleri ve türbin ünitelerine bağlı uzak uç birimleri (RTU) ile haberleşmeyi sağlayacak merkezi haberleşme birimlerinden oluşacak şekilde tasarlanmaktadır.

5.1.1 Sistem Sunucuları

Sunucu bilgisayarları endüstriyel uygulamalara uygun, 24 saat kesintisiz çalışabilecek özellikte ve yeterlilikte olmalıdır. Sistemde 2 adet sunucu bilgisayarının yer alması öngörülmüş ve donanımsal olarak aralarında yedekli çalıştırılması sağlanacaktır. Sistem Sunucuları SCADA merkezinde türbin istasyonlarında yer alan Uzak Uç Birimleri (RTU) üzerinden verileri toplamaktadır.

5.1.2 Veri Arşivleme

Sunucu bilgisayarları ölçülen ve toplanan verilerin uzun süre saklanabilmesi, talep edildiği durumda istenildiği anda çağrılabilmesi, raporlanabilmesi amacıyla endüstriyel uygulamalara uygun, 24 saat kesintisiz çalışabilecek özellikte ve yeterlilikte arşiv bilgisayarları olarak tasarlanmaktadır. Bilgisayarların konfigürasyonu arşivlenmesi istenen verilerin örnekleme/ölçüm sıklığına, çeşitliliğine ve süresine göre seçilmelidir.

5.1.3 Operatör İş İstasyonları

Türbin sistemin işletilmesi, türbin çalışma durumlarının gözlenebilmesi, verilerin anlık olarak takip edilebilmesi, türbinlerin uzaktan kontrolünün sağlanacağı "Operatör İş İstasyonu" birimlerinin kurulmasını gerektirmektedir. Operatör iş istasyonu endüstriyel uygulamalara uygun 24 saat kesintisiz çalışabilecek durumda ve yeterlilikte olacaktır. Sistemde 2 adet iş istasyonu kurulacaktır. Her bir iş istasyonu birden fazla SCADA ekranının (mimik ekranları) aynı anda görüntülenmesine imkân sağlaması amacıyla 2 adet monitöre sahip olacaktır. Operatör iş istasyonları istemci (client) yapısında SCADA sunucu (server) bilgisayarlarına bağlı olarak çalışacaktır.

5.1.4 Mühendislik-Bakım İstasyonu

SCADA sistemi kapsamında bulunan programlanabilir donanım ve yazılımların uzaktan konfigüre edilebilmesi, ilgili parametrelerin değiştirilebilmesi, yazılım güncellemesi ve yazılımsal sorunlara uzaktan müdahale edilebilmesi amacıyla bir "Mühendislik-Bakım İş İstasyonu" kurulumu gerekmektedir.

5.1.5 Web Server İstasyonu

Türbinlerin bulunduğu alandaki yerel kontrol merkezi haricinde konum ve mesafe gözetmeksizin internet sağlayıcıları üzerinden SCADA Sistemine bir izleyici olarak dâhil olabilmek amacıyla sistemde bir adet "Web Server" kurulumu gerekmektedir.

5.1.6 Operatör Konsolu

Operatör konsolu SCADA kontrol merkezi donanımlarının monte edildiği bilgisayar ve sunucu (server) bölmelerini, LCD montaj tablalarını, Kesintisiz Güç Kaynağı, masa ve diğer kurulum ekipmanlarını kapsamaktadır. Operatör konsolu sistemin izlenebilirliğini artıracak yönde tasarlanacaktır. Tasarlanan örnek operatör konsolunun genel yerleşim planı **Şekil 11**'de yer almaktadır.



Şekil 11. Operatör konsolu genel yerleşimi

5.1.7 Uzak Uç Birim (RTU) Tasarımı ve Üretimi

Uzak Uç Birimleri (RTU), SCADA sistemi için türbin ve generatör ünitelerinden verileri toplayacak ve merkeze iletecek olan ünitelerdir. Bu üniteler buldukları istasyonlardaki sinyal ve veri kapasitesine göre geliştirilmektedir. RTU'lar çevre şartlarına uygun IP ve EMC koruma sınıfındaki panolara yerleştirilecektir. RTU üniteleri modüler yapıda tasarlanmakta olup, bu yapı sisteme genişleme ve büyüme olanağı sağlamaktadır. Tasarlanan örnek bir uzak uç birimi (RTU) Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 12. Uzak Uç Birimi (RTU)

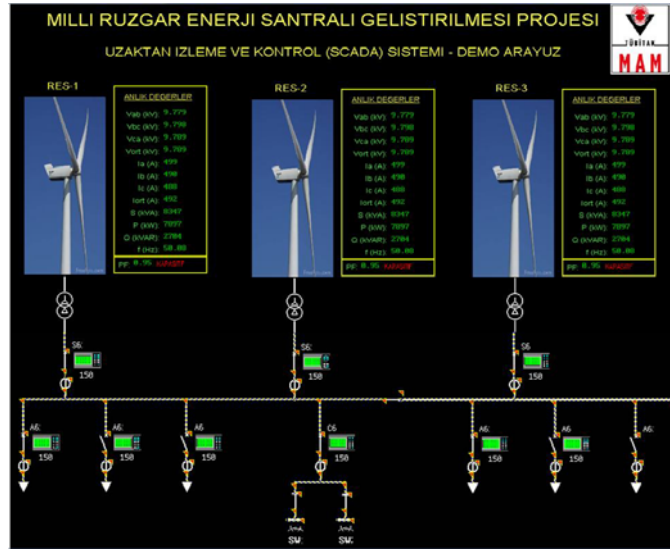
Uzak Uç Birimlerinin birden fazla endüstriyel cihaz ile farklı protokollerde (Modbus TCP/IP, Modbus RTU, DNP3.0 vb) haberleşmesi iletişim esnekliği açısından oldukça önemlidir. Uzak Uç Birimi üzerinde toplanan verilere ait zaman bilgilerinin diğer Uzak Uç Birimler ile senkronizasyonunun yapılması amacıyla GPS alıcıları kullanılmaktadır. Ayrıca, olası enerji kesintilerine karşı Uzak Uç Biriminin kendi DC UPS ünitesi olması işletme kolaylığı sağlamaktadır.

5.2 SCADA Yazılımı ve Haberleşme Sistemi

5.2.1 SCADA Yazılım Modülleri

SCADA Sistemi kapsamında planlanan konfigürasyon dâhilinde geliştirilecek olan yazılım modüllerinin aşağıda listelenen bileşenlerden oluşması beklenmektedir. Bu modüller SCADA sisteminin yazılımla ilgili kısmını oluşturmaktadır. MİLRES projesi için planlanan kullanıcı arayüz yazılımından bir kesit Şekil 13'de sunulmuştur.

- SCADA Server Yazılımı
- SCADA Arşiv Yazılımı
- Operatör İş İstasyonu Yazılımı
- Mühendislik İş İstasyonu Yazılımı
- Raporlama yazılımı
- Alarm Modülleri
- Bakım- İş Emri Çıkartma yazılım Modülü vs
- Web Server Güncelleme Yazılımı
- Yedekleme Yazılımı
- Diğer sistemlerle entegrasyon yazılım modülü



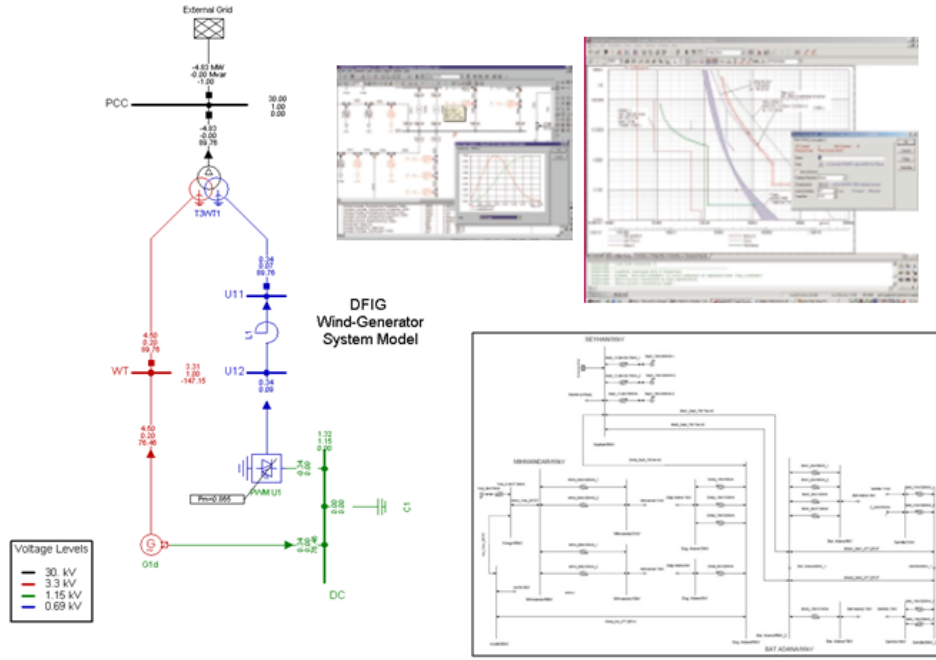
Şekil 13. MİLRES projesi için planlanan kullanıcı arayüz yazılımından bir kesit

5.2.2 Haberleşme Sistemi

Bir rüzgâr çiftliğinde SCADA Merkezi rüzgâr türbinleri arasında veri aktarımını kesintisiz sağlayacak olan bir haberleşme sistemine sahip olmalıdır. Haberleşme sistemleri fiber optik, bakır telli veya kablosuz olabileceği gibi uygulamaya göre farklı haberleşme çözüm altyapıları da tercih edilebilmektedir. Haberleşme sistemi %100 yedekli çalışma prensibine göre tasarlanmaktadır. İdeal durumda haberleşme hattının herhangi bir noktasında ortaya çıkacak arıza durumunda iletişim kopmadan yedek hattan haberleşmeye imkân sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Haberleşme sistemi tasarlanırken dikkat edilecek bir diğer husus türbinlerin aralarındaki ve merkezle olan mesafelerdir.

6. RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTISI

Rüzgâr enerjisi üretim sistemlerinin şebeke bağlantısı esnasında ortaya çıkabilecek enerji kalitesi ve sistem kararlılığına ilişkin problemleri incelemek ve çözümler üretmek santralin sağlıklı işletilebilmesi için oldukça önemlidir. Türbin ve generatör sistemlerinin şebeke ile uyumlu çalışmasını sağlayacak yöntemlerin geliştirilmesi, türbin kontrol algoritmalarının ve rüzgâr santrallerinin şebeke bağlantı kriterlerine uygunluğunun incelenmesi ve bu sonuçlar kullanılarak santralin OG Şebeke bağlantı alt yapısı ve koruma sisteminin tasarımının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Şekil 14'de örnek RES bağlı şebeke analiz ekranları sunulmuştur.



Şekil 14. Örnek RES bağlı şebeke analiz ekranları

RES'lerin şebeke bağlantısı öncesinde aşağıda belirtilen çalışmaları yapılması gerekmektedir:

1. Sistem benzetimi ve analizi
 - i. Kalıcı hal analizleri (yük akışı, vs.)
 - ii. Geçici hal analizleri (kısa devre, bara gerilim seviyesi değişimleri, vs.)
2. Çeşitli çalışma senaryolarının uygun test sistemlerinde incelenerek sistem optimizasyonu
3. Türbin kontrol algoritmasının ve tüm elektrikselsel elemanların (generatör, trafo vb.) birlikte bilgisayar ortamına aktarılarak uygunluğunun test edilmesi
4. Rüzgâr santralinin Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'nde belirtilen EK- 18 Şebeke Bağlantı Kriterlerine uygunluğunun analizi ve incelenmesi
5. Rüzgâr santralinin Şebeke bağlantısı için Orta Gerilim Trafo Merkezinin OG hücresi, bara, kablo vb. alt yapısı ile koruma sisteminin tasarımı

7. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN GÜÇ KAYNAKLARI

Bu bölümde rüzgâr türbinlerinin ana işlevi olan rüzgârın mekanik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek yüke veya şebekeye veren generatörler ve konvertörlerden oluşan güç kaynaklarını biraz daha yakından tanıyacağız.

7.1 Rüzgâr Türbinlerinde En Sık Kullanılan Generatör Çeşitleri

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr gücünden elde edilen enerjiyi generatörler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi özellikle 500 kW ve üzeri güçteki rüzgâr türbinlerinde yaygınlaştıkça kullanılan generatör tipleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- **Asenkron Generatör:**
 - Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SCIG)
 - Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (WRIG)
 - ❖ Çift Beslemeli Asenkron Generatör (DFIG)
 - ❖ Optimum Kaymalı (OptiSlip) Asenkron Generatör (OSIG)
- **Senkron Generatör:**
 - Rotoru Sargılı (Alan Sargılı) Senkron Generatör (WRSG)
 - Sabit (Daimi, Kalıcı) Mıknatıslı Senkron Generatör (PMSG)

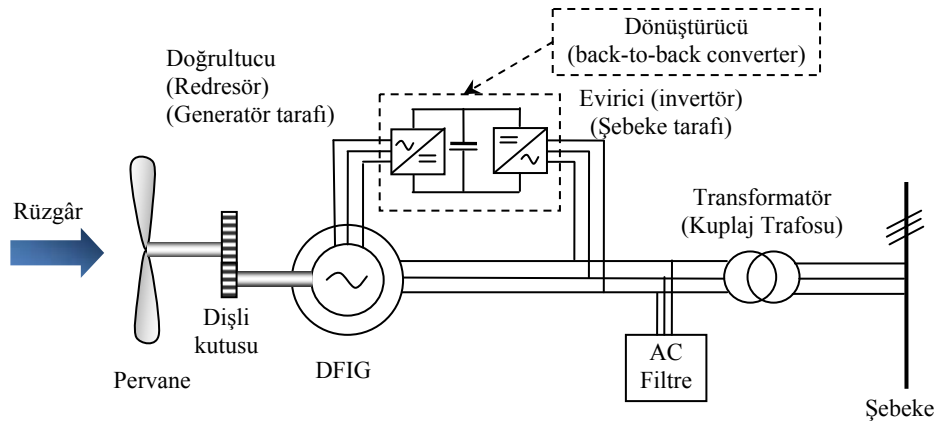
Bunlardan imalat ve işletme kolaylığı avantajları sebebiyle en sık kullanılanı bir çeşit rotoru sargılı, bir başka deyişle bilezikli, asenkron makine olan Çift Beslemeli Asenkron Generatördür (DFIG). Bir sonraki bölümde **Şekil 15**'de görüleceği üzere rotor bağlantısı üzerinden kontrol edilmeleri sebebiyle kendi anma güçlerinin yaklaşık üçte biri güçte konvertörle kontrol edilme avantajına sahiptirler. Bu yüzden değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde tercih edilmektedirler. DFIG generatörlerin en önemli dezavantajları ise 750 veya 1500 devir/dk gibi yüksek devirlerde döndüklerinden büyük çevirme oranlı dişli kutularıyla birlikte kullanılmak zorunda olmalarıdır. Bilindiği gibi yüksek güçlü rüzgâr türbinlerinde pervanenin anma dönüş hızı 15-30 devir/dk aralığındadır. Öte yandan özellikle sabit mıknatıs üretme teknolojisindeki gelişmeler ve güç elektroniğinin gittikçe daha büyük güçte dönüştürücü (konvertör) yapmaya elverişli hale gelmesi gibi gelişmelere paralel olarak doğrudan tahrikli (direct drive) Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör (PMSG) kullanımı yaygınlaşmaktadır. Hem rotor sargılarında, hem de dişli kutusunda oluşacak kayıplardan kurtulmuş olunacağından bu makinelerin kullanıldığı rüzgâr türbinleri daha yüksek randımanlı olmaktadır. Ancak bu durumda generatör pervaneye dişli kutusu olmaksızın doğrudan bağlandığından düşük hızlı nominal devir sayısı elde etmek için PMSG'nin yüksek kutup sayısına sahip olması gerekmektedir. Bu da geniş çaplar, büyük hacimler ve ağırlıklar, dolayısıyla imalat zorluk ve maliyetleri anlamına gelmektedir. Sabit mıknatısların rotora montajı da ayrıca bir imalat zorluğu getirmektedir. PMSG'ler de değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanıldığından gerekli olan konvertörün Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'da görüldüğü gibi stator bağlantısı üzerinde olması nedeniyle bütün güce maruz kalması, dolayısıyla tam güçte tasarlanmak zorunda kalınması bir diğer önemli dezavantajdır.

Görüldüğü gibi DFIG (Doubly Fed Induction Generator) ve PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) içeren rüzgâr türbinlerinde enerji çevrimi konvertör (dönüştürücü) sistemleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu konvertör sistemleri kW'lar ve MW'lar mertebelerinde boyutlandırılabilirler. Konvertörlerin yapıları ve özellikle boyutları generatör tiplerine göre farklılaşmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde yer alan konvertör sistemleri maksimum verimlilikle, şebeke iletim ve dağıtım yönetmeliklerinin belirttiği kriterlere uygun olarak enerji üretimini gerçekleştirmelidir. Rüzgârdan enerji üretimindeki en önemli zorluklardan biri rüzgâr karakteristiğinin ve hızının çok değişken olmasıdır. Rüzgâr hızında ve yönünde meydana gelen değişimler generatörlerin ürettiği enerjide dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu dalgalanmanın şebekeye yansıtılmadan aktarılması işlevi konvertörlere aittir. DFIG ve PMSG generatörleri içeren rüzgâr türbinlerindeki konvertör yapısı şebekeye regüleli enerji akışı sağlamak amacı ile art arda bağlı (back-to-back) yapıda iki konvertör bloğundan meydana gelmektedir. Rüzgâr türbinlerinde DFIG ve PMSG'den başka yukarıda listelenen diğer tipteki generatörlere de rastlanmaktadır. Örneğin Danimarkalı rüzgâr türbin firması Vestas tarafından geliştirilen ve özellikle ani rüzgâr yüklerinin (gust) şebekeye etkisini azaltıcı bir yapıda tasarlanan Optimum Kaymalı Asenkron Generatör (OSG) önemli bir tasarım ve uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır, ancak bu tipte reaktif güç kontrolü kuvvetli değildir. Bir diğer tip olan Sincap Kafesli Asenkron Makine endüstride motor olarak sıkça kullanıldığı halde moment-hız eğrileri doğrusal olduğundan rüzgâr hızındaki dalgalanmaları doğrudan çıkışa verirler bu da kontrolü çok zorlaştırır. Dolayısıyla şebeke bağlantılı (on-grid) rüzgâr türbinlerinde kullanılmak için pek elverişli değildir. Sabit mıknatıslı yapının getireceği montaj ve imalat zorluklarından kaçınmak için tercih edilebilen klasik Rotoru Sargılı Senkron Generatör yüksek verimli, tam kontrollü olduğundan güç faktörü doğrudan kontrollü, doğrudan tahrike (direct drive) uygun bir makinedir ancak rotor sargı devresi (sargıları) bulunması ve bu devrenin dışarıdan beslenmesi gerekliliği dezavantajlarıdır.

Buna göre güç kaynaklarını en sık karşılaşılan generatör tiplerine (DFIG ve PMSG) ve elektriksel dönüştürücü (konvertör) bağlantı mimarilerine göre biraz daha yakından inceleyelim.

7.2 Çift Beslemeli Asenkron Generatör (DFIG) Güç Kaynakları

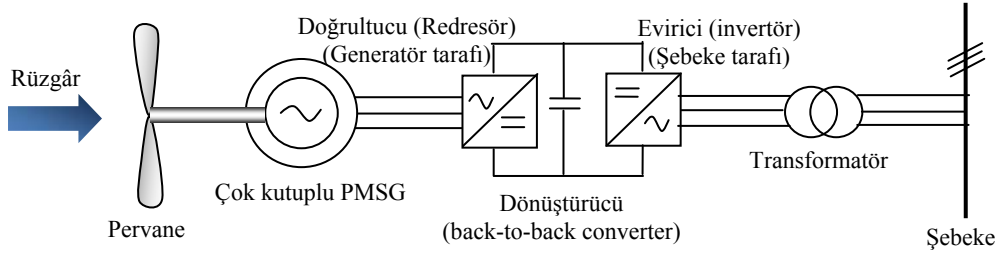
Çift beslemeli (uyartımlı) asenkron (endüksiyon) generatör (DFIG) sistemleri rüzgâr türbinlerinde kullanılan en yaygın generatör yapısıdır. Bu generatör tipinin yer aldığı rüzgâr türbinlerinde **Şekil 15**'deki gibi bir güç aktarma yapısı kullanılır. Bu yapının önemli özelliği generatör sargılarından stator tarafında yer alan sargı şebekeden uyarılırken, rotor sargısının ise kontrollü bir güç kaynağı bloğu tarafından uyarılmasıdır. "Back-to-back converter" mimarisinde olan bu kontrollü güç kaynağı yapı olarak senkron generatör sisteminde kullanılan güç kaynağı ile birebir aynıdır; ancak DFIG sistemlerinde güç kaynağı üzerinden toplam gücün yaklaşık %40'ı aktarılmaktadır. Bu mimari sayesinde güç kaynağının boyutları (güç değeri) küçülmekte, üzerinde meydana gelen kayıplar azalmaktadır. Sistemde ana güç akışı ve uyartım şebeke üzerinden sağlanırken, rotor tarafında yer alan güç kaynağı rüzgâr değişimlerinden dolayı meydana gelen dalgalanmalara karşı sistemin regülasyonunu sağlamaktadır. Anma gücünün %40'ının güç kaynağı üzerinden aktarılması büyük güçlerde sistem tasarımını kolaylaştırırken, güç kaynağı sistem dinamiklerinin tam anlamıyla kontrollü açısından yetersiz kalabilmekte dolayısıyla daha karmaşık bir kontrol yapısı gerektirmektedir. **Şekil 15**'de DFIG (Çift Beslemeli Asenkron Generatör) ile kullanılan güç kaynağı yapısı gösterilmiştir.



Şekil 15. DFIG (Çift Beslemeli Asenkron Generatör) güç kaynağı yapısı

7.3 Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (PMSG) Güç Kaynakları

Yukarıda sözü edildiği gibi sabit mıknatıslı senkron generatörler rüzgâr türbinlerinde kullanılan en yaygın generatör tiplerinden biri olmaya başlamıştır. Bu generatörlerin yer aldığı rüzgâr türbinlerinin tasarımları dişli kutulu veya dişli kutusuz olarak gerçekleştirilebilir. Bu tip generatörlerin ürettiği elektrik enerjisi rüzgâr değişimine bağlı olarak yüksek oranda salınımlıdır. Elde edilen bu enerjinin tamamını şebekeye şebekeyi dalgalandırmadan aktarabilmek amacı ile generatör çıkışı kontrollü bir doğrultucu bloğuna bağlıdır. Generatörden üretilen dalgalı enerji doğrultucu ile doğrultularak bir bara üzerinden evirici bloğuna aktarılır. Evirici bloğu ise bara depolan enerjisi tekrar alternatif akıma çevirerek şebeke standartlarına uygun alternatif akım üretimini gerçekleştirir. Ardı ardına bağlı sistemler iki konvertörden meydana gelmesinden dolayı enerji kayıpları artmaktadır. Buna rağmen üretilen enerjinin şebekeye kontrollü şekilde aktarılması kolaylığı nedeni ile önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu güç kaynağının tasarımında generatör uyartım, şebeke bağlantı, şebeke senkronizasyon ve şebeke yük durum kontrolleri önemli kontrol işlemlerinden bazılarıdır. Bu tip sistem kontrolleri gerçekleştirdiğimiz yapılarda DSP tabanlı kontrolörler tercih edilmektedir. Diğer önemli bir kontrol birimi olan maksimum güç noktası tarama (MPPT) algoritmaları güç kaynaklarının da bağlı olduğu kontrol sistemi tarafından yürütülmektedir. **Şekil 16**'da PMSG (Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör) ile kullanılan güç kaynağı yapısı gösterilmiştir.



Şekil 16. PMSG (Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör) güç kaynağı yapısı

8. MİKRO KONUŞLANDIRMA (MICRO SITING)

Rüzgâr türbinlerinin yerleşim veya konuşlandırma hesapları yapılırken yer şekilleri, bitkiler, diğer rüzgâr türbinleri ile olan etkileşim, gürültü, türbülans gibi çeşitli faktörler dikkate alınmalıdır. Eğer türbin mikro-konuşlandırması iyi yapılmazsa tüm bu kısıtlar türbinlerin meydana getirdiği rüzgâr elektrik santralinden üretilen toplam gücü ciddi ölçüde düşürebilir. Rüzgâr elektrik santrali (RES) kurulacak saha içinde rüzgâr türbinlerinin en fazla üretim yapabilecek şekilde yerleştirilmesi ve uygun türbin tipini seçme işlemine mikro-konuşlandırma (micro-siting) denir.

Mikro-konuşlandırmada dikkat edilmesi gereken temel noktalar şunlardır:

- Rüzgâr hız ve yönünün istatistiksel verileri
- Yerleşim yerlerine uzaklık
- Arazi mülkiyeti
- Karayollarına erişilebilirlik
- Rüzgâr türbinlerinin çevreye olan etkisi: şebekeye olan elektriksel etkiler ve işitilebilir gürültü

Mikro-konuşlandırmada ilk adım rüzgâr santralının kurulacağı alanın topografik haritalar ve uydu verilerinden yararlanılarak ve sahanın bizzat keşfi yapılarak incelenmesidir. Tüm bu veriler yer şekillerini, ağaçları, yolları, çeşitli engelleri ve diğer rüzgâr türbinlerini içeren bir bilgisayar modeli oluşturmak için kullanılır. İkinci adım rüzgâr santralinde üretilen enerjinin, arazideki rüzgâr ölçüm direklerinden en az bir yıl alınan rüzgâr hız ölçümlerine dayanarak hesaplanmasıdır. Hâkim rüzgâr yönü, yıllık ortalama rüzgâr hızı ve türbülans düzeyleri de bulunur. Arazi ve yer şekilleri bilgileri ve meteorolojik bilgiler ile santralin kurulacağı alandaki mevcut koşullar büyük hassaslıkla hesaplanır. Tüm bu verilerle ve çeşitli bilgisayar hesaplamaları ile uygun rüzgâr türbini tipi, kule yüksekliği, türbinlerin tek tek ve bir arada üretecekleri yıllık enerji miktarları bulunur ve optimum rüzgâr tarlası yerleşimi belirlenir.

Bir rüzgâr santralının kabul edilebilir olmasında santralin meydana getireceği gürültü etkisinin dağılımı da önemli bir parametredir. Bu nedenle yerleşim yerleri ile rüzgâr santrali arasında, yerleşim yerlerinde yaşayan insanların gürültü ve şebeke gerilimindeki olumsuz etkilerden etkilenmemeleri için en az 500 metre olmalıdır. Ayrıca mesafe, atmosferik ve yeryüzü absorpsiyonu gibi faktörleri de içeren bir gürültü yayılma modeli kullanılarak türbinlerin santral içindeki yerleşimleri uygunlaştırılarak gürültü seviyesi düşürülebilir.

Mikro-konuşlandırmada kullanılan yaygın yazılım Danimarkalı EMD firması tarafından geliştirilen WindPro'dur. WindPro ile bilgisayar ortamında, türbin dizilimi ve elektriksel dizaynı da içeren rüzgâr santrali tasarımı yapmak mümkündür. Yazılım, yapılan santral tasarımının enerji üretimini, türbin gürültü seviyelerini ve türbin kayıplarını hesaplamaya da imkân tanır. WindPro kendisine girdi olarak Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Yazılımı (WAsP) ya da çeşitli hesaplamalı akış dinamiği yazılımlarının verilerini kullanır. WindPRO verileri bankalar tarafından rüzgâr santrali kurulumu için müşterilerine verilecek kredi miktarının ve şartlarının belirlenmesinde de kullanılır (piyasa deyimiyile "bankability").

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerjide dışa bağıllığın azaltılması, enerji maliyetlerinin düşürülmesi, ek istihdam yaratılması ve çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesi gibi amaçlarla rüzgâr enerjisi sektöründe ciddi yatırımlar yapılmalıdır. Bu yatırımlar kararlı devlet politika ve teşvikleri ile yönlendirilmeli, koordine edilmeli ve etkinleştirilmelidir. Ülkemizdeki Rüzgâr Enerjisi sektörüne tekrar hatırlatacak olursak 1 Kasım 2007 itibariyle EPDK'ya yapılan toplam lisans başvurusu 86GW, kesinleşmiş toplam gücümüz (kurulu, inşa halinde, sözleşmesi imzalanmış) 2.5GW mertebesindedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın bu alandaki resmi öngörüsü 10 Yıl içinde yaklaşık 20GW rüzgâr gücü kapasitesine ulaşmaktır. Bu değer 20-30 yıl içinde tahminen 40GW kurulu kapasiteye ulaşacaktır. Tamamen yabancı firmaların hâkim olduğu ülkemiz piyasa şartlarında maliyetler kabaca megavat başına 1.5 milyon Amerikan dolarını bulmaktadır (1.5 milyon USD/MW). Bu da kesinleşmiş toplam kapasitemiz 2GW için 3 Milyar USD, 10 yıllık toplam 20GW için 30 Milyar USD ve 20-30 yıl içinde gerçekçi bir tahminle toplam 40GW için 60 Milyar USD gibi son derece yüksek meblağların söz konusu olduğunu göstermektedir. Yurt dışına akacak bu milli servetin mühim bir kısmının, hiç değilse çeyreğinin, yerli üretimle karşılanması için yukarıda sözü edilen gerekli her türlü teşebbüste bulunulmalıdır. Bir diğer önemli konu elektrik enerjisi üretim lisansı gerektirmeyen birkaç kilovatlar mertebesinde 500kW'a kadar küçük ve orta güçlü rüzgâr türbinleri meselesidir. Ülkemiz sanayicileri maalesef bu alanda da henüz kendisini ispatlamış tasarım ve imalata sahip değildir. Yurt içi ve yurt dışı pazarlarına güvenle çıkabilecek bir rüzgâr türbin firmamız henüz temayüz etmemiştir. Makine, elektromekanik, elektronik ve inşaat sektörlerinde dünya pazarlarında ülkemizi başarıyla temsil eden firmalarımızın ülke olarak sahip olduğumuz önemli yenilenebilir enerji potansiyelimizin değerlendirilmesinde, dolayısıyla enerji ve ilgili teçhizatı dışa bağımlılığımızı azaltmada ve işin tabiatı gereği emek yoğun olan bu alana yatırım yaparak istihdamı arttırmada hayati yükümlülükleri bulunmaktadır. Devletimiz de bu alanda Ar-Ge faaliyetleri yapan ve imalat tecrübesi olan araştırma kurumları, üniversiteler ve özel sektörün önünü açmak üzere Enerji ve Tabii Kaynaklar; Bilim, Sanayi ve Teknoloji, Çevre ve Şehircilik ile Orman ve Su İşleri Bakanlıklarının ilgili birimlerince her türlü yasal düzenleme ve teşvik tedbirlerini akılcı bir plan ve eşgüdümle yerine getirmelidir.

Not: Bu bildiri daha önce TMMOB Makina Mühendisleri Odası Bursa Şubesi tarafından 11-12 Mart 2011'de Bandırma ve Gönen'de düzenlenen "Rüzgâr Enerjisi ve Rüzgâr Türbinleri Yerel Sempozyumu"nda sunulan bildirinin güncellenmiş ve genişletilmiş versiyonudur.

10. KAYNAKLAR

- [1] Elektrik İşleri Etüt İdaresi: http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_index.html
- [2] I. Munteanu, A. I. B. Nicolaos, A. Cutululis, E. Ceang ,(2008) ,"Optimal Control of Wind Energy Systems" Springer.
- [3] van der Hoven, I. (1957). "Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0,0007 to 900 cycles per hour." Journal of Meteorology 14, pp,160–164.
- [4] F.D. Bianchi, H. De Battista, R. J. Mantz,(2007) , "Wind Turbine Control Systems" ,Springer
- [5] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers,(2002) "Wind Energy Explained" John Wiley & Sons Ltd.
- [6] B. Boukhezzer, L. Lupu, H. Siguerdidjane, M. Hand, (2007),"Multivariable control strategy for variable speed variable pitch wind turbine" Renew.Energy, vol. 32, no. 8, pp. 1273-1287.
- [7] T. Esbensen, B.T. Jensen, M.O. Niss, C. Sloth (2008) "Joint power and speed control of wind turbines" Technical Report, Aalborg University.
- [8] P.C.Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, (2002),"Analysis of Electric Machinery and Drive Systems", John Wiley & Sons Ltd.
- [9] Z. Mahi, C. Serban, H. Siguerdidjane,(2007), "Direct torque control of a doubly-fed induction generator of a variable speed wind turbine power regulation" EWEC
- [10] H. Zhang, Z. Wang,(2009), "Study on modeling and simulation of double-fed induction wind power generator control system" Sustainable Power Generation and Supply
- [11] Y. Zhao, X.D. Zou, Y.N. Xu, Y. Kang, J.Chen,(2006), "Maximal power point tracking under speed-mode control for wind energy generation system with doubly fed induction generator" IPEMC
- [12] <http://www.teknikhayat.com/enerji/ruzgar-enerjisi2/>

- [13] T. Ackermann, "Wind power in power systems", J. Wiley, 2005
- [14] T.Sandhya, K. Sri Chandan "Control and Operation of Opti-Slip Induction Generator in Wind farms" International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology – ICCET2011, 18th & 19th March, 2011
- [15] E. Dursun, A.K. Binark "Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler" VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008 İstanbul