

AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

BİLİM ve TEKNİK



YENİ UFUKLAR

ELEKTRİK ŞEBEKESİ

MAYIS 2008 SAYISININ PARASIZ EKİDİR

Hazırlayan: Prof. Dr. Vural Altın

ELEKTRİK



Mizah uğruna ayrımcılık veya ayrımcılık pahasına mizah denemesi: Yaşlı bir bayan bir otelin lobisinde dolaşırken, elektrik enerjisi üzerine bir konferansın yer almakta olduğu bir salona girmiş. Konu dikkatini çekince, hazır girmişken, yapılan hararetli konuşmaları, hayretler içinde kalarak dinlemiş: “Talep artışı, arz yetmezliği, güç kalitesi, enerji sıkıntısı vb... Kahve molası verildiğinde, genç bir katılımcıya yaklaşıp sormuş: “Kuzum bu insanlar niye bu kadar telaşlı böyle? Ne-yi tartışıyorlar heyecanlı? ‘Elektrik sıkıntısı, enerji yetmezliği’ filan... Ben me-sela evde aleti takıyorum prize, elektrik geliyor: Nedir bu insanların derdi, ben anlayamadım...”

Çoğumuz elektriği prizden alırsız. Priz bizim için, her an için emrimize amade olan, 220 voltluk bir salınımlı (AC) gerilim kaynağıdır (Bknz. Gerilim, emk). Ancak geri planda, onun bu hizmeti sunabilmesini sağlayan dev bir şe-

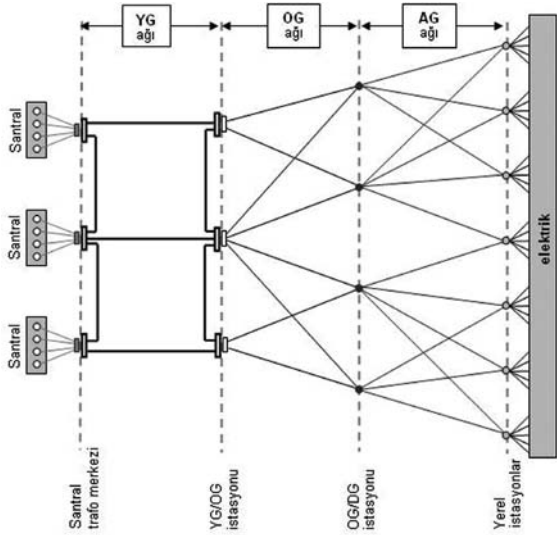
beke ve karmaşık süreçler var. Gerçi yolda sık sık, direkler arasında uzanan birkaç kablo görürüz. Ama üzerinde fazla kafa yormayız. Halbuki ‘güç şebekesi, ‘enterkonnekte sistem’, insan aklının ortaya koyduğu en karmaşık sistemlerden biridir. Belki de en karmaşığı...

Elektrikle öncelikli ilişkilerimiz, üretim ve tüketimden oluşuyor. Bu ilişkileri iki ilkeyle yönetiyoruz. Birincisi, bir bobinin, içinden geçen manyetik alanın değişmesi halinde, uçları arasında gerilim oluşması. Salınımlı akım (AC) jeneratörleri, bu ilkeye dayanarak gerilim üretiyor (Bkz. AC jeneratörü). İkinci ilke; üzerinden salınımlı akım geçirilen bir bobinin, içindeki bir diğer bobinde akım uyarıp, onu dönmeye zorlaması. Motorlar bu ilkeye göre çalışıyor ve elektriğin çoğunu, motorlarda iş yaparken tüketiyoruz. Aslında iki ilke, birbirinin simetrisi. Tıpkı, jeneratörle motorun birbirinin tersi olması, tersine çalıştırılan bir jene-

ratörün motor gibi davranmasında olduğu gibi...

Üretimle tüketim aşamaları arasında, bir de iletim gereği var. Dolayısıyla, elektrik şebekesi; üretim birimleri ve tüketim merkezleriyle, aralarındaki iletim ve dağıtım hatlarından oluşuyor. Yan sayfadaki şekilde bir şebeke çizimi görülmekte. Sol tarafta santraller, sağ tarafta tüketiciler. Gerilim santral çıkışlarında yüksek, tüketicilere yaklaştıkça düşüyor. Yol boyunca; yüksek, orta ve alçak gerilim hatları mevcut. Gerilim düşüşleri, aradaki istasyonlarda gerçekleştirilmekte. Üretim birimleri, bazen birbirlerinin gücüne gereksinim duyabildiklerinden, birbirlerine bağlı. Dikkat edilecek olursa, istasyonlar ve tüketim merkezleri, birden fazla geliş hattına sahip. Bu; hatlardan birindeki gücün kesilmesi halinde, diğer bir hattan güç sağlanabilmesi için. Türkiye’de halen 577 üretim birimi mevcut. İletim hatlarının uzunluğu, 46.000 km’den fazla:

ŞEBEKESİ



Ekvatoru fazlasıyla saracak kadar. Dağıtım hatlarının ise, 812.000 km: Ay'a gidip geldikten sonra, ekvatoru iki kereden çeyrek fazla dolanacak kadar. İletim hatlarında, yaklaşık 67.000 MVA gücünde, 1.000'den fazla trafo var. Dağıtım ağlarında ise, 78.000 MVA toplam güce sahip, 250 binden fazla ...

Elektriğin kritik bir özelliği, büyük ölçekte depolanamaması. Dolayısıyla her an için, ne kadar tüketiliyorsa, o kadarının üretilmesi lazım. "Ne kadar köfte, o kadar ekmek" meselesi. Halen hakim olan, büyük kapasiteli merkezi birimlere dayalı üretim şebekelerindeki güç akışı, ağırlıklı olarak tek yönlü; santrallerden tüketim merkezlerine doğru. Rüzgar gibi; yerel, küçük ölçekli ve üretimi değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlanabilmesi için, iki yönlülüğün sağlanması gerekmektedir. Bu ise şebekenin yapısı ve yönetiminde, oldukça kökten değişiklikleri gerektiriyor. Halbuki şebeke şimdiki haliyle, zaten oldukça karmaşık...

'Güç kalitesi' açısından, AC gerilimin üç özelliği büyük önem taşıyor; frekansı, genliği ve aynı derecede önemli olmakla beraber, pek tanışık olmadığımız fazı. Bunların sabit tutulması gerekmekte. Frekans santral çıkışlarında, jeneratörlerin kapasitesi zorlanmadıkça, sabit. Bizde ve Avrupa'da, 'saniyede 50 salınım',

yani 50 Hz. Gerçi alternatör ve trafolarla, bunun katları olan 'harmonikler' de oluşur, ama genlikleri normalde küçüktür. Halbuki gerilimin genliği, iletim ve dağıtım hatları boyunca, malzemenin direnci nedeniyle, doğrusal olarak azalır. Aşırı güç çekildiğinde de öyle. Bu yüzden, aynı gerilim ağındaki bir hat boyunca, düşen gerilimin arada bir yükseltilmesi gerekir. Bu işlem, ara istasyonlardaki 'gerilim düzenleyici' ('regulator') trafolarla yapılmaktadır. Ancak, ağ-

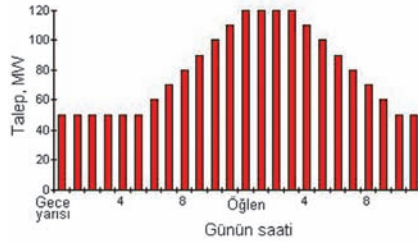
dan veya bir kısımdan çekilen güç, kapasiteyi zorlayacak düzeye ulaşıncaya, düzenleyiciler işlevlerini yerine getiremez hale gelirler ve tüketici ucundaki gerilim düşer. Lambalar normal parlaklığında yanamadıklarından, buna 'kahverengileşme' ('brown-out') deniyor. Kapasite daha fazla zorlanırsa, hatlardan bazılarında güç kesilebilir; ya da yıldırım düşmesi veya bir kaza sonucunda hat eriyebilir: Buna da 'arıza'... Gerilim düşüklüğü pek çok aygıtı tasarım sınırlarının dışında çalışmak zorunda bırakır ve hızlı yıpranmaya yol açar. Frekans da öyledir ve güç kalitesinin düşüklüğü pahalıya malolur. Faz daha da karmaşık...

Örneğin fırındaki ısıtıcıyı kullanırken, 'direnç gücü' ('rezistif) kullanırız. Dirençte akım, gerilim yükseldikçe artar,

düşükçe azalır; gerilimle akımın aynı fazda olduğu söylenir. Halbuki bir motor çalıştırırken, bir dirence karşı iş yapıyor olmanın yanında ayrıca, gereken manyetik alanları oluşturmak için bir bobin de kullanıyor oluruz. Bobinde ise, gerilim zirvede iken, akım sıfırdır ve akımın gerilimi '90° faz farkı'yla izlediği söylenir. Öte yandan, ideal bir bobin net olarak güç tüketmez; manyetik alanı inşa ederken şebekeden güç çekip, alanı azaltırken geri verir. 'Endüktif' güç olarak nitelendirilen bu durum, diyelim 10 damacana su siparişi verip, sipariş kapıya geldiğinde ikisini geri göndermeye benzediğinden; şebekede gereksiz iletim kayıplarına ve kapasite kullanımında verimsizliğe yol açar. Bir kapasitörde ise, gerilim akımı izler. Gerçi yaptığımız işlerde pek fazla kapasitör kullanmıyoruz. Ama kapasitör de bobine benzer şekilde, net güç tüketmez; plakalarını yüklerken şebekeden güç çekip, boşaltırken geri verir. 'Kapasitif güç' denilen bu durum da tek başına, şebeke yönetimi açısından, keza sıkıntı verici. Fakat bobinle kapasitör arasındaki toplam 180°'lik faz farkı, yani zıtlık, bize bir imkan tanır: Her bobinin yanına, uygun büyüklükte bir kapasitör konulsa; şebekeyi sürekli rahatsız etmeksizin, aralarında enerji açısından paslaşıp durabilirler. Bu nedenle dağıtım şirketleri büyük miktarda güç kullanan müşterilerinin, tesisatlarına, kullandıkları bobin gücüne uygun 'kapasitör grupları' koymalarını şart koşar. Ancak yine de, konutların tüketimi



direnç ve bobin ağırlıklı olduğundan, kapasitif ve endüktif güçler genelde, birbirini dengeleyemez. Bu ikisinin toplamına, şebekeyle karşılıklı güç alışverişi anlamında 'reaktif güç' deniyor. Bir hattan çekilen gücün reaktif bileşeni arttıkça, gerilimle akım arasındaki faz farkı büyür ('kosinüs faktörü') ve şebeke tam kapasiteyle kullanılamaz hale gelir. Farkı asgaride tutabilmek için, iletim ve dağıtım şirketleri tarafından, trafo istasyonlarına, kapasitör grupları yerleştirilir. Amaç, bu kapasitörlerin o an için gereken miktarını devreye sokup çıkartarak, şebekenin güç iletim kapasitesini olabildiğince yüksek tutmaktır. Dolayısıyla, trafo istasyonları sadece gerilim değiştirmekle kalmazlar, başka işlevler de yerine getiren elemanlarla da donanımlıdır. Örneğin, kalın iletken 'bağlama çubukları' ('busbar') üzerinden, istasyona gelen ve giden hatlar arasında güç dağılımı yapılır, sistem davranışı hakkında veriler toplanır. Türkiye'deki yük dağıtım sistemi 6 bölgeye ayrılmış durumda. Her birinde bir Bölge Kontrol Merkezi (BKM) var. Hepsi, Gölbaşı'danki Ulusal Kontrol Merkezi'ne (UKM) bağlı. BKM'ler 160



Tipik bir günlük talep eğrisi

santral veya trafo merkezinden, gerçek zamanlı olarak; aktif güç, reaktif güç, gerilim, frekans, trafo kademe pozisyonu verilerini, akım ve bunun gibi analog ölçümleri, enerji sayaçlarının ve anahtarlama teçhizatının durumlarını, alarm düzeyleri hakkındaki bilgileri topluyor. Sistem UKM tarafından bu verilere göre izlenip yönetilmekte.

Şebekeden talep edilen güç düzeyi; gün içinde saatten saate, hafta içi ile sonu arasında, yıl içinde mevsimden mevsime değişir. Üretimin bu değişime ayak uydurması gerekmektedir. Talebin, her an için sağlanması gereken asgari düzeyine 'temel yük' denir ('baz'). En yüksek değer civarı 'zirve', altında kalan, temel yüke kadarki kısım da 'orta yük' düzeyi olarak nitelendirilir. Ekonomik açıdan

temel yükün, üretim filosundaki işletme ve yakıt masrafları en düşük olan santraller tarafından karşılanması esastır. Bunlara 'temel yük santralleri' denir. İlk yatırım maliyetleri yüksek olsa dahi, yıl boyunca çalıştırılıp, görece düşük masrafla elektrik üreteceklerinden dolayı, kurulmaları ekonomik olabilir. Talep orta düzeye doğru tırmadıkça, elektriği daha pahalıya üreten santraller devreye sokulur veya üretimleri artırılır. Bunlara 'orta yük santralleri' deniyor. Birim üretim masrafını yükseltirler. Talep zirveye doğru yaklaştığında da, pahalı yakıt kullanan 'zirve yük santralleri' devreye sokulur. Bu santrallerin kuruluş maliyeti düşük olmak zorundadır. Çünkü, yıl boyunca çok az, toplamda birkaç gün ve hatta saat için kullanılacak olduklarından, yüksek bir yatırım bedelini kaldırmazlar. Buna karşılık, pahalı yakıt kullansalar da olur. Nasılsa az çalışacaklarından, fazla yakıt yakmayacak, fakat zirve talebin de kesintisiz karşılanmasını sağlayacaklardır. Örneğin doğal gaz santralleri böyle santrallerdir: Kuruluşu hızlı, yatırım bedeli düşük, fakat yakıtı pahalı. Ortalama birim üretim maliyetini

Gerilim, emk

Elektrik gerilimi elde etmenin iki yöntemi vardır. Birincisinde, elektostatik yüklerden ve kuvvetlerden yararlanılır. Bunun için örneğin, değişik uygun malzemelerden yapılmış iki rulman arasında dönen yalıtılan bir kayışın uyguladığı sürtünme kuvvetinden yararlanılır. Bu kuvvet aracılığıyla, rulmanların birinden koparılan elektrik yükleri ötekine taşınıp, sivri uçlu bir metal elektrotun üzerinden, ikinci rulmanın dışındaki içi boş bir metal kürenin iç yüzeyine aktarılır. Dış yüzeyinde elektrik yükü birikmesi sağlanır ve kürenin 'yere göre gerilimi' yükseltilir (Van de Graaf jeneratörü). 'Yere göre gerilim'den söz edilmesinin nedeni yerkürenin yüzeyindeki gerilimin, hemen her zaman sıfır olmasıdır. Çünkü yarıçapı çok büyük olduğundan, aldığı birim yük başına yüzeyinde oluşan gerilim değişimi sıfıra yakındır. Dolayısıyla, üzerine ne kadar büyük yük akıtılırsa akıtılsın, yüzeyinde kayda değer bir gerilim oluşmaz. Bir bakıma 'dipsiz bir yük çukuru' gibidir. Topraklama da bu nedenle yapılır.

Kürenin gerilimi, üzerindeki yüklerin, dışarıda yol açtığı elektrik alanından kaynaklanır ve bu elektrik alanına eşlik eden skaler bir 'potansiyel fonksiyonu' vardır. Kürenin yere göre gerilimi, bu fonksiyonun küre yüzeyindeki ve yeryüzündeki değerleri arasındaki fark kadardır. Karmaşık görünen bu anlatım, gerçekte tanışık olduğumuz kavramlardan oluşur. Kürenin yüzeyine bir miktar yük koymak -ki bunlar yerden de alınmış olabilir- tıpkı yerden bir avuç taş alıp, belli bir yüksekliğe kaldırmak gibidir. Nasıl ki kaldırılan taşların yere göre 'kütleçekimsel potansiyel' enerjisi artmışsa, kürenin de yere göre 'elektrostatik potansiyel enerji'si artmış olur. Taşlar, bıraktığımızda kütleçekimi kuvvetinin etkisiyle yere düşerken hızlanıp kinetik enerji kazanacaklarsa, küreden yere bir iletkenle bağlantı kurulduğunda, yükler de elektrik alanının etkisiyle yere doğru hızlanıp kinetik enerji kazanır. Hız kazanmış taşlarla iş yapılabilir, hız kazanmış yüklerle de öyle.

İki nokta arasındaki gerilim farkı, birim büyüklükteki bir yükü birinci noktadan ötekine taşımak için yapılma-

sı gereken iş kadardır. Dolayısıyla gerilimin birimi, yük başına enerjidir (Joule/Coulomb) ve buna volt denir.

Elektrik gerilimi elde etmenin ikinci yöntemi, elektostatik kuvvetlerin yerine, elektromanyetik kuvvetlerden yararlanmaktır. Bu yöntem Faraday'ın 'endüksiyon yasası'na dayanır. Yasa şöyledir: Sabit bir manyetik alan bileşenine dik yönde hareket ettirilen iletken bir telin ya da içinden geçen manyetik 'alan miktarı' (akı) zamanla değişen iletken bir halkanın uçları arasında 'elektromotor kuvveti' (emk) oluşur. Bunlardan birincisine, iletkenin hareketli olması nedeniyle, 'hareketli emk', ikincisine de manyetik akı zamanla değiştiğinden dolayı, 'dinamik emk' denir. EMK bir kuvvet değil, bir tür gerilimdir ama 'potansiyel farkı' da değildir. Birimi volt, adındaki 'kuvvet' terimi yanıltıcı bir tarihsel kalıttır. Hala kullanılmasının nedeni, olguyu örneğin, üzerinden akım geçen bir direncin uçları arasında oluşan potansiyel farkından ayırd etmek içindir. Gerçi oluştuğu her bağlamda, kendisine zıt yönde eşlik eden bir potansiyel farkı da oluşur. Ancak bu potansiyel farkı tarafında kamufle edildiğinden, doğrudan ölçülmesi olanaksızdır.

yükseltirler. Ama toplamdaki payları düşksek eğer, bu o kadar önemli değildir. Fakat, Türkiye'nin üretim filosu ters bir kompozisyonda yakalanmış durumda. Çünkü 2008 yılı elektrik ihtiyacının %48'ini doğal gaz santrallerinde yapacağı üretimle karşılamak zorunda.

Güç talebinin tüketim merkezleri temelinde izlenip, üretim santralleri arasında dağıtılması gerekmektedir. Gerçi santraller, jeneratör çıkışlarına gelen talebi otomatik olarak izleyip, karşılamaya çalışırlar. Ancak, kapasiteleri zorlandığında, devre dışına çıkıp, kendilerini güvenceye alırlar. Bu durumda, taşıdıkları güç payının, diğer santrallara aktarılması gerekir. Onlardan bazıları da domino etkisiyle zorlanıp, devre dışına kaçarsa, sistem tümüyle güç üretemez hale gelir. Buna da 'şebeke çöküşü' deniyor, genel karartma...

Yer darlığı dolayısıyla yarıda kesmek pahasına; şebeke yönetimi, her an için jet hızıyla hareket etmekte olan karmaşık bir aracı yönetmek gibi. Bu yazımızda dikkatinizi biraz, bu sistemin büyüleyiciliğine çekmek, kabaca da olsa bileşenlerinden bazılarını tanıtmak istedik. Umarız okurken sıkılmazsınız...

Türbinler

Türbin, bir akışkanın potansiyel ve kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir düzenektir. Bir shaftın üzerine, eksenine dik daireler oluşturacak şekilde yerleştirilmiş kanat dizilerinden oluşur. İtki (impuls) ve tepki (reaksiyon) türbini olmak üzere, iki çeşidi vardır. İtki türbinlerinde daha çok, akışkanın kinetik enerjisinin kullanımı amaçlanır. Yüksek kinetik enerjiyle gelen akışkan, jetler halinde kanatlara yönlendirilir ve çarpışma sonucunda yön değiştirilerek, kanatlara momentum aktarır. Momentum aktarma hızı kuvvet anlamına gelir ($F=m\Delta v/\Delta t$). Kanat üzerinde oluşan net kuvvetin etkime noktası, kanat ne kadar uzunsa (L), shaft ekseninden o kadar uzaktır (r). Bu uzaklığa, yani 'kuvvet kolu'na r diyelim ($r=L$). Kanat, örneğin ω açısal hızıyla dönmekte olan shaftla birlikte döndüğünden, kuvvet, bir daire üzerinde saniyede ωr kadar yol alır. 'Kuvvet çarpı yol' mekanik iş demektir ($W=\omega r F$). O halde, saniyede yapılan iş, yani güç, kanat uzunluğuyla doğru orantılıdır



($P=\omega LF$). 'Kuvvet çarpı kuvvet kolu'na tork da denir ($T=r.F$). Dolayısıyla, güç aynı zamanda 'tork çarpı açısal hız'a eşittir ($P=\omega T$). Türbinin dönme hızı sabitse eğer, güç yalnızca tork büyüdükçe artar. Tork da akışkanın özelliklerindeki değişimin yanında, kanat uzunluğuyla doğru orantılıdır. Hesabı daha çok Newton'un ikinci, 'net kuvvet yasası'na dayalıdır ($F=d(mv)/dt$).

Tepki türbinlerindeyse, türbin bir basınç kabının içinde olup, kabı her an için tümüyle dolduran akışkana gömülü haldedir. Akışkan türbin yüzeyini yalayarak akarken, kanatlara kuvvet uygular. Oluşan tork ve üretilen gücün hesabı daha karmaşık olup, 'hesaplamalı akışkanlar mekaniği'nin konusudur; daha ziyade Newton'un üçüncü, 'karşıt eylem yasası'na dayanır ($F=m.a$).

Hidro

Hidroelektrik santrallerdeki türbinler bilindiği üzere, akışkan olarak kullandıkları suyu, bir akarsu kaynağından ya da baraj gövdesinin arkasından gelen bir tünelden alırlar. Güç ayarı su debisinin kontrolüyle yapılır. İtki tipi olanlarda, suyun enerjisi önce, uygun şekle sahip bir borudan geçirilip, çıkış ağzında su jeti haline getirilerek, kinetik enerjiye dönüştürülür. Daha sonra bu jet, kap şeklindeki rotor kanatlarına püskürtülür. En yaygın olanı, şekilde görülen 'Pelton türbini'. 50-1300 m arasındaki, orta ve büyük düşme yük-

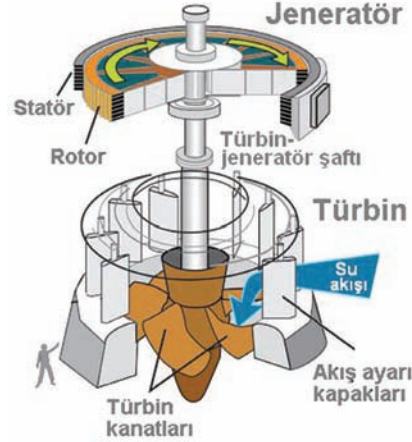
seklikleri için kullanılır. Kapların geometrisi, su jetinin enerjisini en yüksek oranda emecek biçimde tasarlanmıştır. Ortalarından geçen dikey bölücü plakalar, suyun iki yana doğru 'takatsizce' dağılmasını sağlar. Pelton türbinleri, düşey ya da yatay olarak konumlandırılabilir. Jetlerin sayısını arttırmak suretiyle, tek bir rotordan sağlanan güç arttırılabilir. Yatay konum için genellikle iki olan jet sayısı, dikey konumlar için çoğunlukla dört ya da nadiren daha çok olabilir. Yatay konumlandırma halinde, tek bir jeneratörü süren aynı shaft üzerine, bir yerine iki rotor yerleştirmek de mümkündür. En yüksek verim, rotor kaplarının hızı, su jetinin hızının yarısı kadar olduğunda elde edilir. Bu durumda, tam yükün de %60-80'i arasında çalışılıyorsa eğer, türbinden geçen suyun kaybettiği potansiyel enerjinin %90'dan çoğu mekanik işe dönüştürülebilir. Jetlerdeki suyun debisi, boru ağzının içinde kayan





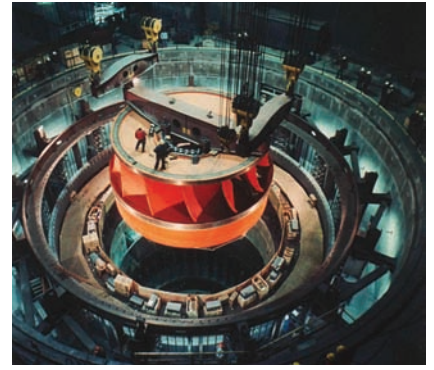
Tepki tipi bir Kaplan su türbini

bir 'mızrak' tarafından kontrol edilir. Hareketleri yağ basıncıyla çalışan bir servomotor tarafından otomatik olarak yönetilen mızrak, ağız çıkışını kısmen ya da tamamen kapatabilir. Böylece su jetinin hızını, değişen yük talepleri, su yükseklikleri ve debileri için yaklaşık sabit tutulabildiğinden, rotor çok farklı ağız açıklıklarında dahi aynı hızla dönebilir. Bu nedenle, iyi tasarlanmış bir Pelton türbininin verimlilik eğrisi düz, fakat öteki tiplerinkine oranla da-



Bir Kaplan su türbin-jeneratörünün şeması.

ha düşüktür. Boru ağzından çıkan suyun miktarını, yük talebindeki bir düşüşe paralel olarak hemen azaltmak, borudaki basınçta büyük bir yükselme olacağından olanaksızdır. Öte yandan aynı debiyi püskürtmeye devam, motorun aşırı hızlı dönmesi anlamına geleceğinden, böyle durumlarda jetin önüne, ek bir kontrol aracı olarak sapırtıcı



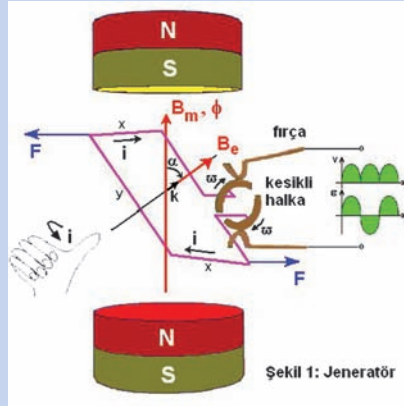
Tepki tipi bir Francis su türbininin sürücüsü montajda, 750 MW.

('deflektör') girer. Sapırtıcı, mızrak devreye girip de debiyi azaltana kadar, jetin kinetik enerjisini kısmen dağıtır.

Tepki türbinlerininse, farklı tipleri vardır. Bunlardan Kaplan türbini, 2-80 m arasındaki küçük düşme yükseklikleri ve fakat yüksek debiler için en verimli olan türbin tipidir. Şekilde görüldüğü gibi, döner kısmını oluşturan rotoru, bir geminin uskur geometrisindedir ve genellikle, alternatör şaftıyla bir-

DC jeneratörü (dinamo)

Bir 'doğru akım' (DC) jeneratörü, örneğin sabit bir mıknatısın manyetik alanı içinde döndürülen iletken bir bobinden oluşur. Şekil 1'de böyle bir düzenek görülüyor. Çizimi basit tutmak amacıyla, bobin tek sarımlı olarak gösterilmiştir. Bobin, şekilde görülmeyen bir türbin tarafından, ω açısal hızıyla saat yönünde döndürülüyor. Mıknatısın manyetik alanı B_m , yön ve büyüklükçe sabittir. Sarımın sınırladığı A yüzeyine dik birim vektör k ve k 'nin, manyetik alan B_m ile yaptığı açı α . Bobin saat yönünde döndürüldüğünden, bu açı, sarım döndükçe büyür. Başlangıç değeri 0 olarak alınırsa, t anında: $\alpha = \omega t$. Manyetik alan B_m 'nin gördüğü 'etkin sarım alanı', yani manyetik alana dik olan alan, $A \cos \alpha$ 'ya eşit ve zamanla değişir. Dolayısıyla, sarımdan geçen 'etkin akı' miktarı $\phi = A B_m \cos \alpha = A B_m \cos(\omega t)$ olup, zamanla değişir. Bu durumda bobin, Faraday Yasası gereği içinden geçen manyetik akı miktarındaki değişime karşı koyan, onu azaltmaya çalışan bir tepki oluştu-



Şekil 1: Jeneratör

rur. Şöyle ki sarımdan geçen manyetik akı, örneğin şekilde gösterilen durumda olduğu gibi, yukarı yönde ve azalıyor olsun: Bobinin uçları arasında, akıdaki bu azalmayı frenlemeye, yani yukarı yöndeki akıyı arttırmaya yönelik bir manyetik alanı üretecek olan akıma yol açacak şekilde bir elektromotor kuvveti oluşur. Gösterilen tepki aslında, bobin malzemesini oluşturan iletkenin yapısındaki yük taşıyıcılarından kaynaklanır ve cisimlerin kütleleri nedeniyle ivemelenmeye karşı gösterdikleri direnişe benzetilebilir. Sonuç olarak endüklenmesine çalışan manyetik alan B_e , sarımın sınırladığı yüzeye dik birim k vektörünün yönünde olduğundan, bu manyetik alanı üretebi-

lecek akım, dolayısıyla da endüklenen emk, sağ el kuralına göre (sağ elin başparmağı B_e yönünde dikleştirildiğinde, kıvrılan öteki parmakların işaret ettiği yönde) olmak zorundadır. Şekildeki sağ el çizimi, akımın yönünü gösterir. Ne ki bu akım ancak, sarımdan güç çekildiği takdirde oluşacak, tersi durumda bobinin uçları arasındaki emk, sarım içinde herhangi bir akım dolaştırmayacaktır. EMK'nin büyüklüğü, Faraday Yasası'na göre, N sarımlı bir bobin için, $\epsilon = -N \cdot d\phi / dt$ ifadesiyle verilir. Yani: $\epsilon = -N \cdot d(A B_m \cos \omega t) / dt = N A B_m \omega \sin \omega t$. EMK'nin yönü, bobinin her turunda iki kez yön değiştiriyor olmakla birlikte bobinin uçlarındaki kesikli halkaya dokunan fırçalar, yarım halkalara sırayla değdiğinden, fırça uçlarındaki gerilim, üstteki V-t grafiğinde görüldüğü gibi hep aynı yöndedir, yani DC'dir. Dolayısıyla şekilde gösterilen düzenek, dinamo da denen bir DC jeneratörü oluşturur. Fırçalar genellikle grafitten yapılır ve yarım halkalarla temas ettikleri yüzeylerde, sık sık elektrik arkları oluşur. Örneğin, bir matkabın sırtındaki yarıkların içinde görülen kıvılcıklar böyle arklardan kaynaklanır ve temas yüzeylerini aşındırır. DC jeneratörleri

likte dikey olarak yerleştirilir. Ancak yatay konumlandırıldığı durumlar da vardır. Uskurdaki kanat sayısı 3 ila 8 arasında değişebilir ve rotor çapı en büyük ünitelerde 10 m'ye ulaşabilir. Akış, şaft eksenini boyunca olur. Dönmesini, tıpkı Pelton türbininde olduğu gibi su jetlerinin sağladığı itme kuvvetinden değil, suyun rotor çıkışında ivmelenmesi sonucu oluşan tepki kuvvetiyle başarır. Tıpkı döner bahçe sulayıcılarında, borudan yüksek basınçla gelen suyun, sulayıcının kavisli kollarına düşük hızla girip, düşük atmosfer basıncıyla karşılaştığında ivmelenerek dışarı çıkması sonucu oluşan tepki kuvvetinin sulayıcıyı döndürmesi gibi.

Tepki tipi türbinlerin bir başkası da, 'Francis türbini'dir. 10-350 m arasındaki orta büyüklükte düşme yüksekliklerinde daha yüksek verimle çalışır. Tasarım gücü civarındayken, %90'ın üzerinde verimi vardır. Tek bir ünitenin gücü 750 MW'ı aşabilir. Büyük hidroelektrik santrallerde, 4-5 ünite paralel olarak kullanılır.



Düşen suyun miktarında ya da düşüş yüksekliğinde veya yük talebinde kayda değer değişiklikler olduğu takdirde, uskur geometrisindeki türbinlerin verimi %75'in altına düşer. Debi fazlalığına karşı önlem görece kolay ve genellikle, giriş vanalarının 'yük talebi-

ni izleyen otomatik kontrolü'yle sağlanır, ya da fazla su, yakın konumda inşa edilmiş olan baca şeklindeki bir depoya ('penstok') saptırılır. Gerekteğinde bu baca suyu, 'yüksüz başlatma' için kullanılabilir. Düşüş yüksekliğindeki mevsimsel değişimlerin ya da yük

bu yüzden, sorunlu ve görece kısa ömürlüdür. Halbuki fırçalar kullanılmadığında, bobinin uçları arasında, alttaki ϵ -t grafiğinde görüldüğü gibi AC gerilim elde edilir. Böyle bir AC jeneratörü, yapısı görece basit olduğundan daha az sorunlu ve daha uzun ömürlü olur. AC gerilimin tercih nedenlerinden biri budur.

Tekrar pahasına jeneratörden güç çekilmediği sürece, bobin sarımlarında emk var olmakla birlikte, akım dolaşmaz. Güç çekildiğinde bobin sarımlarında akım dolaşmaya başlar. Akım, sarımların iletken yapısındaki elektronlarca taşınır. Hareket halindeki bu elektronlara, mıknatısın sabit alanı tarafından $\mathbf{F}_e = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}_m = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B}_m$ kuvveti uygulanır. O zaman şu soru ortaya çıkar: Şekilde bir dikdörtgen olarak gösterilmiş olan sarımın sağ ya da sol kenarları x, ön ve arka kenarları da y uzunluğundaysa, bu kenarlar üzerindeki toplam kuvvetlerin büyüklükleri nedir? Sarımı oluşturan iletkenin yapısının, uzunluğu boyunca aynı olduğunu varsayalım. İletkenin içinde serbestçe dolaşabilen elektronların sayısı, birim uzunluk başına n ve uzunluk boyunca hareketlerinin ortalama hızı, yani 'sürüklenme hızı' da v olsun. O

halde, iletkenin herhangi bir kesitinden saniyede n.v tane elektron geçer ve bu, akım şiddetinin $I = n.v.e$ büyüklüğünde olduğu anlamına gelir. Öte yandan, iletkenin dL diferansiyel uzunluğunun tümünde, her an için $dq = dL.n = dL.I/(v.e)$ tane elektron bulunur. Mıknatısın manyetik alanı $\mathbf{B}_m$ 'nin, bu elektronların tümü üzerinde etki ettirdiği kuvvetin büyüklüğü, $d\mathbf{F} = dq\mathbf{v} \times \mathbf{B}_m = -(I/(v.e).dL)e\mathbf{v} \times \mathbf{B}_m = -I.dL.(v/v) \times \mathbf{B}_m$ kadardır. Sarımın herhangi bir noktasındaki elektronların hızı v, hem sarıma o noktada teğet, yani dL doğrultusunda ve hem de akıma ters yönde olduğundan; $-v/v$, hem o noktada sarıma teğet, yani dL doğrultusunda ve hem de akım yönünde bir birim vektör oluşturur. Dolayısıyla, $d\mathbf{L} = dL.(-v/v)$ vektörü, alman noktada sarıma teğet ve akım yönünde bir vektör olur. Bu durumda da $d\mathbf{F} = I.dL \times \mathbf{B}_m$ eşitliğini elde ederiz. Dolayısıyla, sarımın herhangi bir parçası üzerindeki kuvveti, o parça üzerindeki diferansiyel kuvvetlerin toplamı, yani bir integral olarak elde edilebilir: $\mathbf{F} = ?I.dL \times \mathbf{B}_m$. Buradaki I ve $\mathbf{B}_m$ sabit olduklarından, integral $I.(d\mathbf{L}) \times \mathbf{B}_m$ şeklinde basitleşir. Örneğin, sağ ya da sol kenar üzerindeki dL'lerin hepsi

aynı yönde ve sabit bir $\mathbf{B}_m$ 'ye dik olduklarından; $\int d\mathbf{L}$ bize x uzunluğunu verir. O halde, şekilde mavi oklarla gösterilen kuvvetler, $\mathbf{F} = I \times \mathbf{B}_m$ büyüklüğünde olup, zıt yönlüdür. Bu iki kuvvet, aynı doğru üzerinde olduğundan, sarım üzerinde bir 'kuvvet çifti' oluşturur. Sarıma uyguladıkları tork, yani 'kuvvet çarpı kuvvet kolu', $T = \mathbf{F}.y.\sin\alpha = (I \times \mathbf{B}_m).y.\sin\omega$ kadardır. Burada, x.y, sarımın yüzey alanı A'ya eşit olduğundan, $T = I.A.B_m.\sin\omega$ elde edilir. Halbuki, sarımın ön ve arka kenarları üzerindeki kuvvetler, zıt yönlü olmakla beraber, aynı doğru üzerinde olduğundan, bobini kasmaktan başka bir sonuca yol açmazlar. Bobin ω açısal hızıyla dönmekte olduğuna göre, T torku tarafından bobin üzerinde; $W = \omega.T = \omega.I.A.B_m.\sin\omega = -I.d\phi/dt$ hızıyla iş yapılmaktadır ve bunun için gereken enerji türbin tarafından sağlanmak zorundadır. Dikkat edilecek olursa, tek sarım için $\epsilon = -d\phi/dt$ olduğundan $W = \omega.T$ aynı zamanda, $P = I.\epsilon$ 'ye eşittir. Olması gerektiği gibi. Çünkü bu son ifade, türbin tarafından bobin üzerinde yapılan mekanik işin (W), bobinden çekilen elektrik gücüne (P) eşit olması gerektiği anlamına gelir.

talebindeki oynamaların yol açtığı verim düşüklüğü sorunlarını aşmak için de Kaplan türbininde, rotor kanatlarının açıları ayarlanabilir. Bu, yağ basıncıyla çalışan ve genellikle rotor gövdesi içine yerleştirilmiş bulunan bir servomotor aracılığıyla başarılı. Yağ, turbin ve alternatör şaftı üzerindeki yarıklardan geçen borularla iletilir. O anki su akışına göre en uygun kanat açısı ayarı, bir pilot servomotor tarafından yapılır. Bu nitelikleriyle, suyun düşme yüksekliğindeki mevsimsel oynamalar sorun olmaktan çıkar.

Rüzgar türbinleri de su türbinlerine benzer. Akışkanla kaplı olarak çalıştıklarından, akışkanın hem itki, hem de tepkisinden yararlanacak şekilde tasarımlanırlar. En büyük üniteleri 5-6 MW güç düzeyinde olur. Ancak 50 Hz'lik şebeke frekansını tutturan kadar yüksek hızlarda dönemediklerinden, DC gerilim üretirler. Daha sonra, gerekiyorsa, bu gerilim şebeke frekansında AC'ye dönüştürülür. Su ve rüzgar türbinleri, gereksinim duydukları akışkanı doğadaki haliyle kullanır ve akışkanın enerjisi, yenilenebilir niteliktedir. Halbuki buhar ve gaz türbinlerinin akışkanı, ayrıca üretilmek zorundadır. Örneğin, buhar türbinlerinin buharı genellikle, kömür, doğalgaz ya da



petrol gibi bir yakıtın ya da türevinin, bir kazanda yakılarak içeriğindeki kimyasal enerjinin ısıya dönüştürülüp suya aktarılmasıyla üretilir. Gaz türbinleriyse akışkan olarak, doğalgazın yanmasıyla oluşan sıcak gazları doğrudan kullanır. Her ikisinde de amaç, elde edilen yüksek basınç ve sıcaklıktaki

akışkanın termodinamik enerjisini (entalpi), basınç ve sıcaklığını düşürürken mekanik enerjiye dönüştürmektir. Bu tip türbinleri kullanan santraller, akışkanın temin ya da hazırlanma süreci ısıya dayalı olduğundan, 'termik santral' olarak nitelendirilir. Nükleer santraller de bu açıdan, aslında termik santral sınıfına girer. Ancak ısı üretimi kimyasal enerji yerine, kalpte yer alan çekirdek parçalanmalarından açığa çıkan 'nükleer enerji'ye dayalıdır.

Buhar

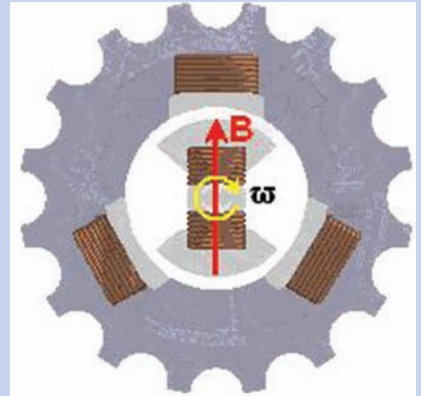
Buhar türbini, statör denilen sabit bir kasa ve içindeki bir şaftın üzerinde sabitlenmiş rotor kısımlarından oluşur. Rotor şaft eksenini boyunca yerleştirilmiş, birden fazla dairesel kanat evresine sahiptir. Şaftı döndüren tork; kazanda ya da bir buhar üreticinde üretilip boru hatlarıyla statöre kadar getirilen yüksek basınç ve sıcaklıktaki buharın, türbinin içinden geçerken rotorun kanat evreleriyle etkileşmesini sağlamak suretiyle elde edilir. İtici türbinlerde, statöre kadar yüksek basınç ve sıcaklıkla gelen buhar, rotor kanatlarına, statördeki meme ağızlarıyla yönlendirilir. Ağızdan çıkarken ansızın genişleyen buharın basınç ve sıcak-

AC jeneratörü (alternatör)

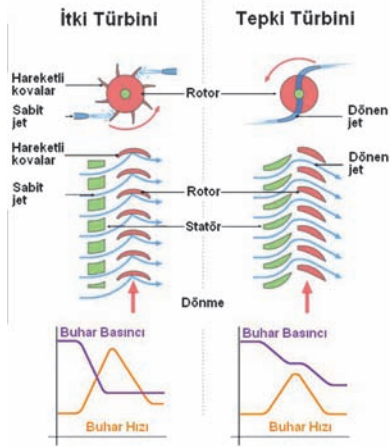
Yukarıdaki düzeneğin durağan kısmına 'statör', dönen kısmına da 'rotor' denir. Bu durumda, statör sabit bir manyetik alan üretmekte ve içinde döndürülen rotordan AC gerilim elde edilmektedir. Ancak genelde, güçlü bir sabit mıknatıs üretmek zor ve pahalı olduğundan, sabit mıknatıs yerine, DC akımla uyarılan bir elektromıknatıs kullanılır. Bu durumda, dıştaki statör bobini DC akımla uyarılır, sabit bir manyetik alan üretir, içte döndürülen rotorun bobininden de AC gerilim elde edilir. Ama güç santrallerinde, hareketli bir parçadan gerilim almak görece zor olduğundan statörle rotorun işlevleri yer değiştirir. Yani rotor bobinine DC akım verilip, manyetik alan üretilirken, statör bobininden gerilim elde edilir. Kısacası, rotor bobini-

ne verilen DC akım, rotora göre sabit bir manyetik alan üretir ve bu alan, rotor türbinin zorlamasıyla döndüğünden, rotorla birlikte dönerek, statör sarımlarında emk endüklenir.

Yandaki şekilde böyle bir alternatör düzeneği görülmüyor. Statörün üç, rotorun tek bobini var. Doğru akımla beslenen rotor bobini, sabit büyüklükte bir B manyetik alanı üretmekte ve türbin tarafından ω açısal hızıyla dönmeye zorlanan rotorla birlikte dönerken, statördeki üç ayrı bobinin üzerinden geçerek, her birinde AC gerilim endüklemektedir. Dikkat edilecek olursa, statör bobinlerinden ardışık herhangi ikisinin eksenleri arasında 120° 'lik açı vardır. Bu nedenle, ardışık bobinlerin AC gerilimleri birbirini, 120° 'lik faz farkıyla izler. Buna 'üç fazlı gerilim' denir. Fazların her üçünün frekansı da rotorun dönme frekansına eşittir. Gerilimlerin büyüklükleri de aynı ama fazları farklıdır. Şimdi soru şudur: Gerilimin büyüklüğünü belirleyen nedir?

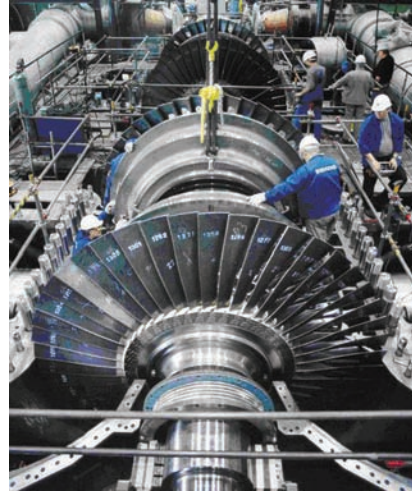


Statör ve rotor bobinlerinin dairesel sarımlı olduklarını varsayalım. Sarım sayıları N_s ve N_r , yarıçaplar da R_s



Bir buhar türbinin kanat kademeleri

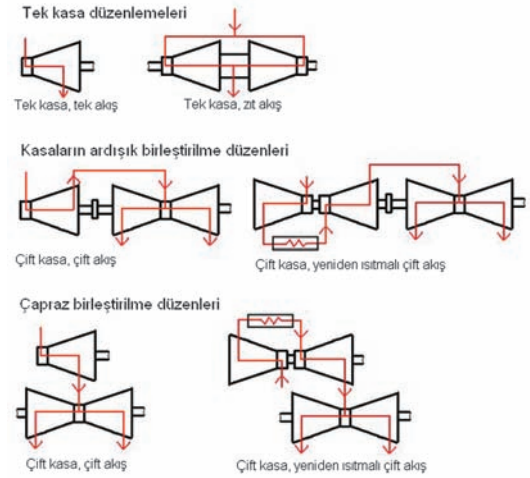
lığı hızla düşerken, kinetik enerjisi büyük oranda artar ve jet halindeki buhar büyük bir hızla, karşısındaki rotor



Bir buhar türbini montaj sırasında.

evresinin kanatlarına çarpar. Tepki tipi türbinlerdeyse her evre, bir dizisi statörde sabit, diğeri rotor üzerinde döne-bilen olmak üzere, karşılıklı iki kanat takımından oluşmaktadır ve statöre gelen buhar, sabit kanatların üzerinden, rotor kanatlarına doğru yönlendirilir. Dolayısıyla, buharın basınç ve sıcaklığı, statördeki ağızdan çıkarken ansızın değil de; önce statördeki sabit ve sonra da rotordaki hareketli kanatları yalayarak ilerledikçe, kademeli olarak azalır.

Aslında buhar türbinleri, verimi yüksek tutmak için, hem itki hem de



tepkiden paralel olarak yararlanacak şekilde tasarlanırlar. Bu yüzden, bir rotorun ardışık kanat evreleri, buharın hareket yönünde giderek artan uzunluklara sahiptir. Yüksek basınçlı buhar, önce kısa kanatlı evre üzerinden geçer ve daha ziyade itki aktarır. Basıncı düştükçe ulaştığı sonraki evrelerin daha uzun kanatları üzerinden 'akar'ken, uyardığı tepki kuvveti aracılığıyla da tork üretmeye başlar. Buharın basıncı yükseken, basıncı azaldıkça hacmi fazla genişmez. Çünkü, yüksek basınçtaki buhar fazla sıkıştırılmaz. Ama düşük basınç bölgesine ulaştıktan sonra, büyük oranda genişleme-

ve R_r olsun. Rotor bobinindeki DC uyarı akımının şiddeti I_r ise, ürettiği manyetik alanın şiddeti $B = \mu_0 N_r I_r / 2R_r$ olur. Önce statör bobinlerinden yalnızca birini, üst ortadakini ele alalım. Rotorun ürettiği manyetik alan B 'nin yönü, $t=0$ anında tam bu bobinin içine doğru bakıyor olsun. O halde, alanın t anındaki açısal konumu, $\alpha = \omega t$ olur. Dolayısıyla, statör bobininin gördüğü akı, zamanla $\phi(t) = N_s A_s B \cos(\omega t)$ şeklinde değişir. Endüklenen gerilimi veren $\varepsilon_1 = -d\phi/dt = N_s A_s B \omega \sin \omega t$ ifadesine, manyetik alan $B = \mu_0 N_r I_r / 2R_r$ yerleştirildiğinde, $\varepsilon_1 = N_s \pi R_s^2 (\mu_0 N_r I_r / 2R_r) \omega \sin \omega t$ elde edilir. Ya da, $\varepsilon_1 = (\mu_0 N_s N_r \pi R_s^2 / 2R_r) \omega I_r \sin \omega t$. Parantez içindeki ifade C ile gösterilirse, kısaca $\varepsilon_1 = C \omega I_r \sin \omega t$. O halde buradaki C , bobinlerin sarım sayılarına ve geometrilerine bağlı olup, alternatörün tasarımıyla, yani fabrika çıkışında belirlenmiş bir sabittir. Statörün diğ-er, diyelim saat yönünde gelen 2 ve

3 numaralı bobinlerdeki gerilimler, 120° 'lik ve 240° 'lik faz farkı taşır: $\varepsilon_2 = C \omega I_r \sin(\omega t - 2\pi/3)$ ve $\varepsilon_3 = C \omega I_r \sin(\omega t - 4\pi/3)$. Görüldüğü üzere, burada gerilimin genliğini değiştirebilecek iki parametre vardır.

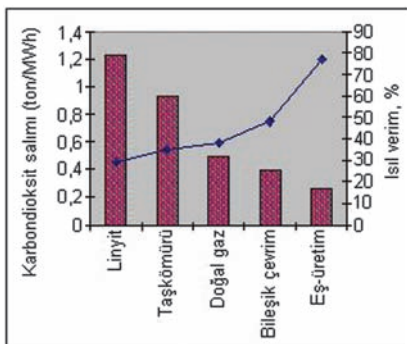
Birincisi, rotorun açısal hızı ω . Ama eğer 'saniyede 50 salınım'lık (50 Hz) gerilim isteniyorsa, rotor sabit bir hızla dönmek, saniyede 50 ya da dakikada 3000 devir yapmak zorundadır ($\omega = 50 \times 2\pi = 100\pi$). Dolayısıyla, gerilimin genliğini değiştirebilmek açısından geriye yalnızca, rotor bobinine verilen uyarı akımı I_r kalır. Bu akımın değerinin, statör bobinlerinden çıkan gerilimlerin genliğinin hedeflenen düzeyde olmasını sağlayacak büyüklükte seçilmesi gerekir. Gerilim düşerse artırılmalı, artacak olursa da azaltılmalıdır.

Ancak uygulanan akım şiddetinin, bobin direncindeki kayıpların yol açtığı ısınmanın sarımlara zarar verebileceği düzeyin yeterince altında kalması gerekir. Bu yüzden, uyarı akımının uy-

gulanabilecek en büyük değerini sarımların yapımında kullanılan iletkenin fiziksel özellikleri, uzunluğu ve kesit alanı, sarımlar arasındaki yalıtkanın etkinliği vb. tasarım unsurları belirler.

Biz burada rotorun tek bobinli, yani iki kutuplu tek bir mıknatıs olması halini inceledik. Halbuki rotorda bir yerine, şekil düzlemindeki daire üzerine eşit; 90, 60, 45, 30 derecelik açı aralıklarıyla yerleştirilmiş; 2, 3, 4 ya da 6 bobin, yani 4, 6, 8 veya 12 kutup bulunabilir. Ki bu durumlarda statör bobinlerinin gördüğü manyetik alanın yönü rotorun her turunda, 1 yerine 2, 3, 4 ya da 6 kez değiştiğinden; 50 Hz'lik gerilim frekansı elde etmek için rotorun dakikada 1500, 1000, 750 veya 500 devir yapması yeterlidir. Genelde $2n$ kutuplu n bobin için, dakikada 3000/ n devirdir. Rotor türbin shaftına bağlı olduğundan, onunla aynı hızla dönmek zorundadır. Dolayısıyla, rotorun sabit hızla dönmesini sağlayan, aslında türbindir.

ye başlar. Dolayısıyla, buhara genleşeceği hacmi sağlamak için, aynı türbinde birden fazla rotor kullanılabilir ve buhar sırasıyla; yüksek, orta ve alçak basınçlı türbin rotorlarından geçirilir. Yüksek basınç türbini itki ağırlıklı olduğundan, kanatları kısıdır. Orta ve özellikle de alçak basınç türbini tepki ağırlıklı olduklarından, kanatları daha uzundur ve ikincisinin son evresinde, büyük üniteler için 1 metreyi bulabilir³. Buharın basıncı düştükçe, içinde minik zerrecikler halinde nem oluşmaya başlar. Bu istenmeyen bir durumdur. Çünkü, rotora yüksek kinetik enerjiyle çarpan zerrecikler, kanatlardan mikroskopik parçacıklar koparta koparta, kanatları zamanla aşındıracaktır. Dolayısıyla, içeriğindeki nem oranının artmasını önlemek amacıyla, buharın bir rotordan diğerine geçmeden önce, kazana geri gönderilip ısıtılması tercih edilebilir (reheat). Buna rağmen, alçak basınç türbininde bir miktar nem mutlaka oluşur. Buradaki nem oranının %10-12'yi aşmaması hedeflenir ve rotorun kanatları, daha dayanıklı özel malzemelerden yapılır, daha pahalıdır. Buharın türbine giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark ne kadar büyükse, entalpisini mekanik enerjiye dönüştürmenin verimi o kadar yüksek olur. Ancak, çıkış koşulları dış ortamınkilerle sınırlıdır ve sıcaklık 30°C, basınç 1 atm (0,1 MPa) olarak alınır. Girişteyse; buhar 'süper ısıtılmış' değilse, sıcaklığı 440 °C'nin, basıncı da 62 Atm'nin (6,2 MPa) altındadır. Aksi halde (kojenereasyon santrallerinde) sıcaklık 480-510 °C, basınç da 86-100 Atm (8,6-10 MPa) arasında değişir. Sonuç olarak verim, başlangıçtaki evrelerde %60 kadar iken, sonraki evrelerde % 75-85'i bulur ve türbinin tamamı için, ortalama % 75 civarındadır. Kalan % 25, sürtünme kuvvetleri ve buhar akışındaki 'eddy' akımları aracılığıyla ısı olarak kaybedilir.



Alçak basınç türbininden çıkan buhar, soğutulup sıvı hale getirildikten sonra, tekrar buharlaştırılıp yüksek basınç türbinine döndürülmek üzere, kazana geri pompalanır. Kazanda yeniden ısıtılacak olan buharın bu aşamada soğutularak 'yoğuşturulma'sının nedeni, pompalama için gereken enerji sarfiyatını azaltmaktır. Çünkü sıvılar, sıkıştırılmaları zor olduğundan, görece kolay pompalanır. Oysa bir gaz, molekülleri arasındaki ortalama uzaklıklar büyük olduğundan, pompalanma sırasında gevşek bir yay gibi davranıp hayli sıkışarak, büyük miktarda potansiyel enerji depolar ve bu sırada da ısınır. Bu yüzden, belli bir miktardaki gazı pompalamanın enerji maliyeti, aynı miktardaki sıvıyı benzer koşullar arasında pompalamanın 100 katı kadardır. Yoğusturma için kullanılan su, yakındaki bir göl, deniz ya da nehir gibi bir su haznesinden çekilip, hazneye geri verilir. Sonuç olarak, kazan - türbin - yoğusturucu - pompa - kazan 'kapalı devre'sindeki su, 'iş yapan akışkan' olarak, buhar ve sıvı fazları arasında dönüşüp dururken, yoğusturucu suyu çevreye ısı atmaktadır. Atılan ısı nedeniyle, 'buhar döngüsü'nün toplam verimi % 40'ın altında gerçekleşir. Verim düzeyini, atık ısının bir kısmını; yakında varsa eğer, örneğin bir yerleşim merkezinin ya da üretim tesisinin ısı ya da buhar gereksinimini karşılamakta kullanarak değerlendirmek suretiyle yükseltmek mümkün. Bu durumda, düşük basınçta buhar gerekiyorsa eğer, 'yoğusturmasız türbin' kullanılır ve çıkışındaki buharın bir kısmı çekilip ilgili sürece yönlendirilirken, kalanı yeniden ısıtma amacıyla kazana gönderilir. Aksi halde, bir 'buhar çekme' (ekstraksiyon) türbini kullanıp, gereken buharı rotorlardan birinin uygun olan evresinden çekmek gerekir. Her iki halde de, yoğusturma işlevi kısmen ya da tamamen, yararlı ısı süreçleri tarafından yerine getirilmektedir. Böyle bir 'ısı ve güç eş-üretim santrali'nin (CHPP), yakıtın enerji içeriğini değerlendirme açısından verimi % 90'ı bulabilir. Kağıt fabrikası ya da rafineri gibi yüksek basınçlı buhara dayalı ısı süreçlere yoğun gereksinimi olan tesislerde, hem de elektrik gereksinimini karşılamak amacıyla kurulup, üretim fazlası elektriği şebekeye satılabilir ve santral, asıl üretim amacı başka olan

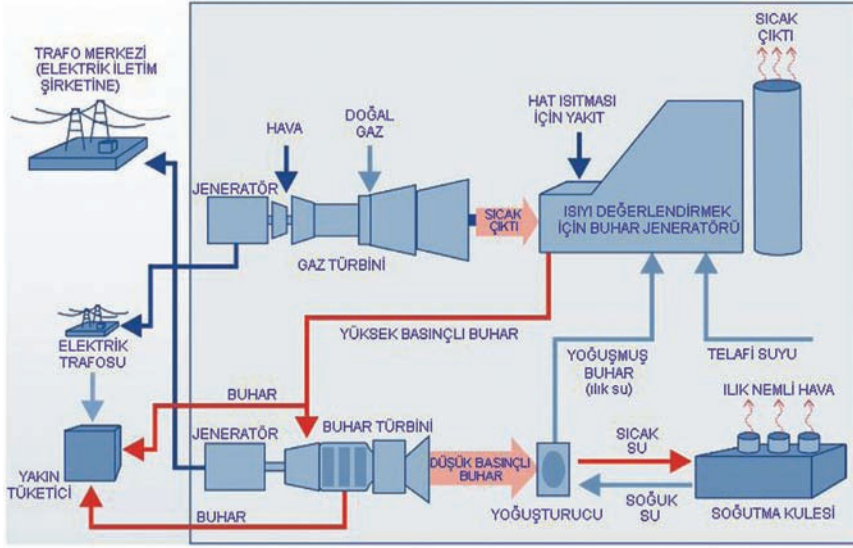
bir tesisin içinde yer aldığından, 'gömülü santral' olarak nitelendirilir. Ancak, küçük çaplı olanlarında, buhar tesislerinin yanında ayrıca bir de elektrik üretim tesisi kurmanın maliyeti nedeniyle, üretilen elektrik pahalıya mal olabiliyor.

Öte yandan, yoğusturucu suyunun, geldiği haznenin ekolojisini olumsuz etkileyecek kadar fazla ısıtmaması için, geri verilmeden önce soğutulması gerekebilir. Bu amaçla, yoğusturucu suyunun dönüş hattını oluşturan borular, alt tarafı açık olan dev parabolik soğutma kulelerinin içinde dolaştırıldıktan sonra boşaltma noktalarına iletilir. Boruların etrafındaki hava ısınır. Civardaki, buhara doymuş atmosferin nemi kısmen, minik su zerrecikleri halindedir. Bu zerrecikler buharlaşıp, ısınan havayla birlikte yükselir. Yükselen havanın yerini, kulenin dışındaki görece soğuk hava, alttaki açıklıktan girerek doldurmaktadır. Kuledeki hava dolaşımı, doğal taşınım ile böyle sağlanır. Yükselen sıcak hava, kulenin tepesine ulaşır ve soğuk havayla karşılaştığında, içindeki buhar, görece iri su zerrecikleri halinde yoğuşur. Yani, kulenin üstünde yükseldiği görülen beyazımsı sisin oluşma nedeni, yoğusturma suyunun buharlaşması değil, atmosferdeki nemin ta kendisidir.

Türbinin şafta uygulayabileceği en büyük tork; kazandan çekilen buharın akış hızına, sıcaklığına ve basıncına ek olarak; rotorların ve rotorlardaki kademelerin sayısına, kanatların geometrisine ve uzunluklarına bağlıdır. Ancak türbin dönerken, en uzun kanatların uç kısımları, en büyük merkezci ivmeye tabi olup, bu ivmeye eşlik eden kuvvetlere dayanmak zorundadır ($F = mv^2/r = m\omega^2r$). Aksi halde, şafttan kopacak olan bir kanat, statör gövdesine saplanıp, ciddi hasara yol açabilir. Dolayısıyla, türbinin üretebileceği en büyük büyük itkiyi, yani şafta uygulayabileceği torkun üst sınırını, kanatlarının yapımında kullanılan malzemenin gücü belirler.

Gaz

Gaz türbinleri jet motoru gibi çalışır. Yanma ürünleri türbine doğrudan verildiğinden, giriş sıcaklığı buhar türbinine göre daha yüksek olup, 1500 °C'yi bulabilir. Bunca yüksek sıcaklık



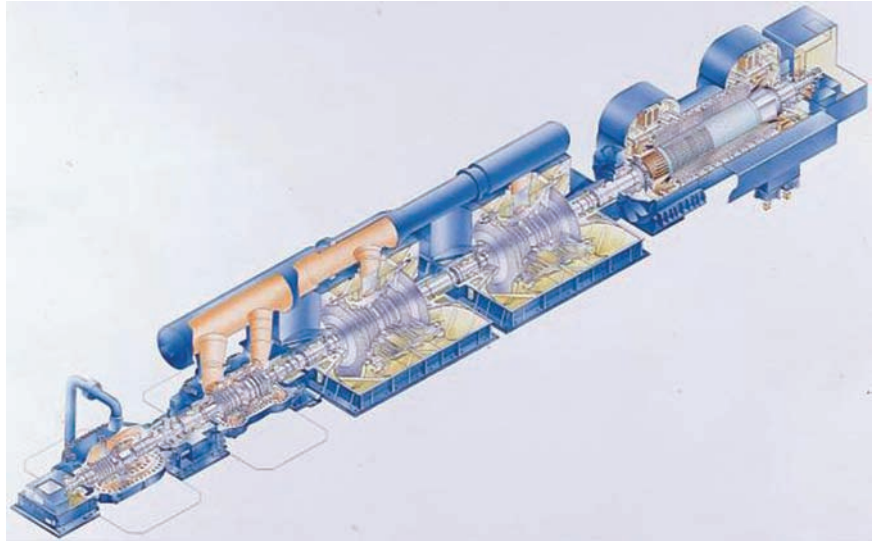
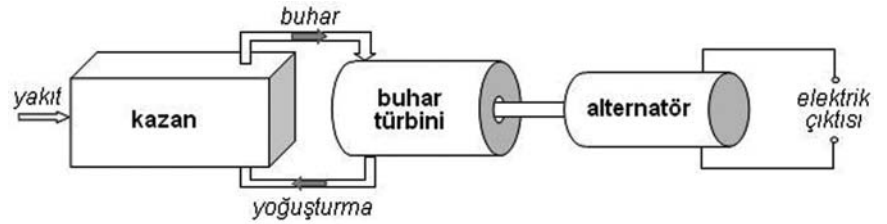
lar sözkonusu olunca, yanma odasının çeperinin ve gaz türbinine bağlantı elemanlarının, en azından başlatma sırasında soğutulması gerekir. Çıkıştaysa, basınç benzer olmakla birlikte, sıcaklık keza yüksek olur. Sonuç olarak, gaz türbininden daha yüksek verim elde edilir. Ancak, gazı yakmak için, büyük miktarda havayı sıkıştırıp gazla karıştırmak gerekir ve gaz sıkıştırmanın enerji verimi daha düşük olduğundan, döngünün pompalama everesi daha fazla enerji tüketir. Dolayısıyla, gaz döngüsü verimi %40'ın altında gerçekleşir. Bu verimi, yüksek sıcaklıktaki çıkış gazlarının ısısını, bir ısı değiştiricisinde su ısıtmak için kullanıp, buhar döngüsüne dayalı ikinci bir türbin aracılığıyla ek elektrik üretmek mümkündür. Hem de, ikinci devredeki türbinin buhar çıkışının bir kısmı, birinci devredeki yanma odasının çeperinin ve türbine bağlantı elemanlarının soğutulmasında kullanılarak, yeniden ısıtılabilir. Bir yandan gaz (Brayton), bir yandan da buhar (Rankine) döngüsüne dayanan bu ikili tasarımı kullanan santrallara 'bileşik (kombine) döngülü güç santrali' (CCPP); ikinci devredeki ısı değiştiricisine de, ısı geri kazanmaya yönelik anlamında, 'ısıyı geri kazanma buhar üretici' (HRSG) deniyor. Gaz ve buhar türbinlerini aynı şaft üzerine oturtan, 'bileşik döngülü gaz türbini' (CCGT) tasarımları da var. Buhar döngüsünden ayrıca süreç ısısı elde ediliyorsa eğer, böyle bir 'termik' santral, 'bileşik döngülü eş-üretim santrali' olur (CCCT). Bu durumda, toplam verim %60'ı bulur. Ancak, santralin maliyeti yükselir ve dikkat

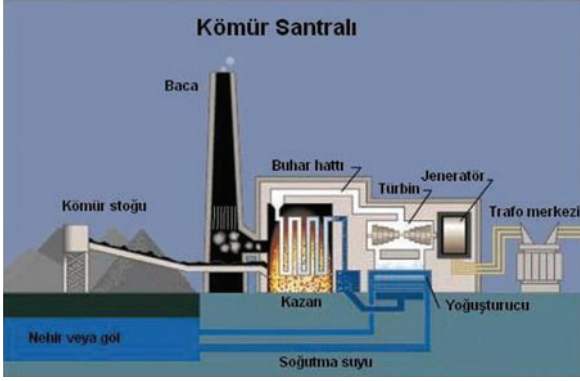
edilecek olursa, bu ek sermaye yatırımlarının hepsi yakıt tasarrufu içindir.

Türbin-jeneratör

Sonuç olarak bir türbin-jeneratör birimi; bir ucundaki türbin tarafından yataklar üzerinde döndürülen ve diğer ucundaki alternatörü döndüren bir şafttan oluşur (bkz. AC Jeneratörü). 500 MW'lık bir buhar ünitesinde, jeneratör bağlantısıyla birlikte şaft uzunluğu 30 metreyi, dönen kütle 250 tonu bulur. Bu kütlenin dakikada 3000 devir hızla dönmesi gerekmektedir. Gerçi

nükleer santrallerin çoğunda olduğu gibi, jeneratör rotoru dört kutupluysa, dönme hızı 1500 devir/dk'ya iner. Şaft, yumuşak metalden ya da yağ emdirilmiş keçe yataklar üzerinde döner. Yatakları sızdırmaz kılmaya çalışmak, aradaki temasın fazla sıkı olması ve yatağın aşınması anlamına geldiğinden, keçelerin biraz yağ sızdırmasına izin verilir. Ancak, türbin kısmından yatağa buhar girmemesi gerekir, çünkü yatağı bozar. Öte yandan, araya katı parçacıklar girerse yatağı aşındırır. Dolayısıyla, keçelere şaft içerisindeki oluklardan yağ iletilir ve bu yağ, dönme sırasında keçeler tarafından sürekli olarak, kendiliğinden emilir. Yatakların, dolayısıyla da şaftın üzerine oturduğu elemanların esnek olması gerekmektedir. Çünkü aksi halde, şaftın hareket serbestisinin fazlaca kısıtlanması; kütle dağılımındaki ufak tefek dengesizliklerin ya da yatay teraziden hafif kaymaların oluşması halinde, kasılmasına yol açar. Bu da, rotorun tam hızla dönerken çılgınca yalpalamaya başlayıp, etrafını darmadağın etmesiyle sonuçlanabilir. Aynı durum, sistemden tahammülünün sınırında yük çekilmeye çalışılması halinde de, türbinin bunu bazen karşılayıp bazen karşılayamaması nedeniyle olur. Halbuki esnek elemanlar üzerindeki rotor, yatağını gerektiği





kadar esnetip, kendisi için en sağlıklı dönme eksenini bulur.

Büyük bir santralda, birden fazla sayıda türbin-jeneratör ünitesi, paralel bağlı olarak çalışır. Kazan, tipine bağlı olarak yılda birkaç kez bakıma alınmak zorundadır. Bakım sonrasında kazanın devreye alınması, donanımdaki bileşenlerin ısı şoka uğramasına yol açmayacak şekilde, kademeli olarak yapılır. Bunun için, başlangıçta üretilen buhar sisteme düşük basınçla salınır ve elemanların yavaş yavaş ısınıp, uyumlu bir şekilde genişmesi sağlanır. Türbinin ise, şaftta ya da rotor kanatlarında yamulmalara meydan vermemek için, homojen bir şekilde ısıtılması gerekir. Bu yüzden, rotor ısınma sırasında, 10-15 devir/dk hızla döndürülür. Ancak, buharın gücü henüz rotoru döndürecek kadar yüksek olmadığından, bu işlem, ayrı bir 'rotor döndürme aygıtı'yla yapılır. Daha sonra, buharın giriş hızı artırılıp, rotor kademeli olarak hızlandırılır. Dönme hızı otomatik bir 'denetçi' tarafından yönetilmektedir. Bu sırada türbinin ürettiği güç, şaftın yataklarındaki sürtünme ve açılal ivmelenme sırasında kütlelerinin sergilediği eylemsizlik kuvvetlerine karşı iş yaparak harcanır. Eylemsizlik kuvvetlerine karşı yapılan iş, şaftın dönme kinetik enerjisinde birikir. Buna türbini 'tırmandırma' ('ramp-up') ya da 'yol verme' işlemi deniyor, en az yarım saat kadar zaman alır. Yolda sıradışı salınımlar algılandığı takdirde, türbini durdurup kasayı açarak, kanat ayarlarının gözden geçirilmesi gerekebilir. 'Soğuk başlatma' denilen bu işlemlerin tamamı, bir ya da birkaç günde tamamlanır. Nükleer santrallerde ise yakıt değiştirme için, bir hafta-on gün gerekir. Halbuki bir doğal gaz santralindeki gaz türbini için, bu

süre daha kısa, birkaç dakikadır. Bir hidroelektrik santralındaysa, rotor genelde çok kutuplu olduğundan, türbin yavaş döner ve bir dakikadan kısa bir sürede devreye alınabilir, saniyeler düzeyinde...

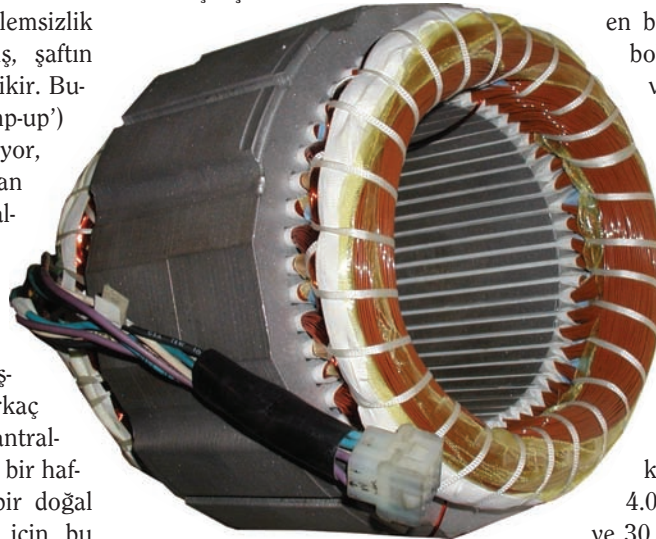
Hedeflenen dönme hızına ulaşıldığında, türbin yalnızca sürtün-

me kuvvetlerini yenecek kadar, görece az bir güç üretmektedir. Alternatör artık çalışmaya hazırdır ve bobinine akım verildiği takdirde, çıkışları arasında gerilim üretmeye başlayacaktır. Çıkışa henüz herhangi bir yük bağlanmamıştır. Rotor bobinine akım vermek için, küçük ünitelerde bir dizel jeneratör kullanılabilir. Ancak, büyük üniteler için gereken jeneratörler pahalı olduğundan, böyle santrallerde uyarı akımı, santralin kendi AC çıkışının DC'ye döndürülmesiyle karşılanır. Dolayısıyla, devreye alınacak olan alternatörün, çalışır halde olan diğer türbin-jeneratör birimlerinden birine 'yük' olarak bağlanması gerekir. Fakat eğer, örneğin genel bir arızadan sonra ya da kazan bakımı sonrasında tüm birimler devre dışı ise, o zaman, uyarı akımının bir başka santraldan sağlanması gerekir. Buna 'siyah başlatma' deniyor. Zaman zaman karşılaşılan bu zorunluluk, büyük santrallerin birbirine bağlı olmasını gerektirmekte. İşlem için genelde hidroelektrik santralleri kullanılır. Çünkü, çalışır halde olmayan bir hidroelektrik santrali, hem kısa zamanda devreye alınabilir, hem de türbini çalış-

tırmak için gereken güç düzeyi, sadece su yolu kapasitesini açmayı gerektirdiğinden, düşüktür. Bu ve uyarı akımı için gereken güç, fazla büyük olmayan bir dizel jeneratör tarafından karşılanabilir.

Rotor bobinine 'dışarıdan' uyarı akımı verildiğinde, statörün çıkışları arasında gerilim oluşur. Gerilimin düzeyi tipik bir ünite 33 kV'tur. Ancak, statörün uçları henüz birbirine bağlı olmadığından, yani devresi açık olduğundan, bobinlerinde akım dolaşmamaktadır. Akım sıfırken elektrik gücü üretilmez ($P=V \cdot I$). Dolayısıyla, türbinin mekanik gücünde artış gerekmez. Mekanik bir benzetmeyle, rotor ve statör, dişli birer çark gibidir. Rotor dönüyor olmakla birlikte, 'diş'leri henüz statörünkilerle eşleşmediğinden, statöre güç aktarılmamaktadır. Sistem tam bu durumda iken statörün, çıkışları birbirine bağlanarak 'kısa devre' yapıldığını varsayalım. Statör sarımlarında, AC akım dolaşmaya başlar. Bu akım, bir manyetik alana yol açar. Manyetik alan her an için, rotorun döner manyetik alanının, statör bobininde yol açtığı akı değişimini azaltacak yöndedir ('Lenz Kuralı'). Yani, rotorun manyetik alanına karşı koyar ve rotor dönmekte zorlanmaya başlar. Mekanik benzetmemizde, çarkların dişleri birbirinin içine girmiş gibidir. Rotor statöre güç aktarmaktadır. Türbin şaftın dönme hızını sabit tutmakta zorlanmaya başlayınca, denetçi devreye girer ve kazandan buhar çekişini hızlandırır. Statördeki akım büyüdükçe, rotorun dönmeye karşı koyuşla birlikte, rotorun türbinden çekip statöre aktardığı güç de artar. Türbinin gücü, üretebileceği en büyük düzeye ulaştığında, statör bobinindeki akım 'denge düzeyi'ne varır. Bu akım, alternatörün üretebileceği en büyük akımdır (I_{max}). Statörün çıkış gerilimiyle çarpımı da alternatörün üretebileceği en büyük güç ($P_{max}=V \cdot I_{max}$)... Dolayısıyla, 33 kV çıkışlı 500 MW'lık bir ünitenin statöründe 15.000 Amper akım oluşur; yani orta çapta bir yıldırımın göbeğindeki kadar...

Rotor ise, görece alçak, 7,5 kV gerilimle, bunun dörtte biri, 4.000 Amper kadar akım çekmekte ve 30 MW düzeyinde güç tüketmekte-



dir. Rotor çektiği elektrik gücünü daima, sarımlarındaki direnç kayıplarına harcar. Çünkü, statöre aktardığı elektrik gücü kendisinininki değil, bağlı olduğu shaftın dönerken yaptığı mekanik işin elektriğe dönüştürdüğü kısmıdır. Ya da shaftın, türbin tarafından üzerinden yapılan mekanik işi, alternatörün rotorundaki elektrik gücünü dayanak noktası olarak kullanıp elektriğe dönüştürerek, statöre aktarmakta olduğu söylenebilir. Statördeki güç ise şimdi-lik, keza sarımlardaki direnç kayıplarına harcanmaktadır. Her iki sarımın da taşıdığı akımlara dayanabilmesi için, hem iyi yalıtılmış olup, hem de soğutulması gerekir...

Statörün içi yağla, dışı da suyla so-

ğutulabilir. Ancak, rotor bir sıvının içinde hızlı dönmeyeceğinden, gazla soğutulmak zorundadır. Hava bu durumda uygun bir soğutucu değildir. Çünkü, yüksek gerilim altında, görece kolay ayrışıp, 'korona etkisi' sergiler ve yakındaki kasaya sıçramalara yol açar. Oysa hidrojen, 13,6 eV'luk görece büyük iyonlaşma enerjisi nedeniyle, yüksek gerilime karşı daha dayanıklıdır. Dolayısıyla, rotorun içinde döndüğü kasa, hidrojen gazıyla doldurulup soğutulur. Hidrojen de ayrıca, dışarıda suyla... Fakat şimdi de şu durum var: En küçük atom olması nedeniyle mikroskopik aralıklardan dahi kolaylıkla sızabilen hidrojen, havayla karıştığı takdirde, ufak bir kıvılcımla patlayabi-

li. Bu olasılığı önlemek üzere içerdeki hidrojenin dışardaki havayla alışverişini kesmek için, rotor bölmesinin çeperindeki ek yerleri, sürekli beslenen yağla yalıtılır. Statörünse doğrudan suyla soğutulması mümkün.

Alternatör bir kez çalışmaya başladıktan sonra, uyarı akımını santralin kendi çıkışından sağlamaya başlar ve birim, 'emre amade' hale gelmiş olur. Santral diğer elektrik gereksinimlerini de aynı şekilde, kendi çıkışından sağlar ve güç üretim kapasitesinin yaklaşık %10'unu, bu amaçla kullanır. Dolayısıyla, emre amade bir santral, kendi güç çıkışına bağlıdır ve başka herhangi bir yük omuzlamamış olsa dahi, kendisini yük olarak taşımaktadır.

İletim kayıpları

Bir enerji kaynağının ekonomik olarak taşınabileceği en uzun mesafe, yolda karşılaşılan kayıpların kaynağın içerdiği enerji miktarına eşit olduğu mesafedir. Elektrik için bu mesafe, mevcut teknolojiler ve şimdiki fiyatlarla, 8000 km kadar. Dolayısıyla elektrik değerli bir kaynak. İletildiği mesafelerin birkaç yüz kilometreyi bulduğu oluyor, Rusya'da 1000 kilometre... Bunu L ile gösterelim. 'Kök altı kare' ('RMS') değerleriyle konuşuyor olalım, ama RMS indisini kullanmayalım. Hedef tüketim merkezi, ortalama P kadar güç talep ediyor olsun. $P = \epsilon \cdot I$ olduğundan, iletim hattından $I = P / \epsilon$ genlikli bir akım çekilir. Hat, alüminyum ya da bakır, hangi malzemeden yapılmış olursa olsun, kendisinin de bir öz direnci (ρ) vardır. Hattın toplam direnci, telinin kesit alanıyla ters, uzunluğuyla doğru orantılı olup, $R_H = \rho \cdot L / A$ 'ya eşittir. Dolayısıyla, tüketim merkezine P gücü iletilirken bir yandan da hattın üzerinde; $P_H = R_H \cdot I^2 = \rho \cdot L \cdot P^2 / (A \cdot \epsilon^2)$ kadar enerji, ısıya dönüşerek ziyan olmaktadır. Yani hattaki kayıpların, hedefe ulaştırılan güce oranı; $y = P_H / P = \rho \cdot L \cdot P / (A \cdot \epsilon^2)$ kadardır. Tüketicinin kullandığı enerjiyi faturalandıracak ve iletim hattındaki kayıpları da bundan karşılayacak olduğumuza göre, bu kayıp oranını olası en düşük düzeye indirmeye çalışmamız gerekir. Diyelim, kayıp/iletim oranı y'nin, Batı



Avrupa ülkeleri için geçerli olan $y_{max} = \%2,5$ oranını aşmamasını hedefliyoruz. Yani $\rho \cdot L \cdot P / (A \cdot \epsilon^2) < y_{max}$ olmak zorunda. Buradaki, L ve P verileri, değiştirme imkanımız olmayan sabitler. Malzemeyi seçtiğimizde, ρ da belirlenmiş olur. Üzerinde oynayabileğimiz yegene değişken olarak geriye, telin kesit alanı A kalır ve onu da, $A > \rho \cdot L \cdot P / (\epsilon^2 \cdot y_{max})$ olarak seçmemiz gerekir. Bu eşitsizliğin her iki tarafını L ile çarparsak; A telin kesit alanı olduğuna göre, sol tarafta L-A bize, hat için kullanılan iletken telin toplam hacmi için; $H > \rho \cdot L^2 \cdot P / (\epsilon^2 \cdot y_{max})$ kısıtını verir. Nihayet, her iki tarafı bir de iletken malzemenin özkütlesi ρ_k ile çarpığımızda, telin toplam kütlesi için $M = \rho_k \cdot H > \rho_k \cdot \rho \cdot L^2 \cdot P / (\epsilon^2 \cdot y_{max})$ kısıtını elde ederiz.

En iyi iletken metaller, sırasıyla gümüş, bakır ve alüminyum. İlk ikisi pahalı. Alüminyum kullandığımızı düşünelim. Alüminyumun öz direnci $\rho = 2,82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, özkütlesi $\rho_k = 2700 \text{ kg/m}^3$. Bunları, $L = 100 \text{ km} = 10^5 \text{ m}$, $P = 500 \text{ MW} = 5 \times 10^8 \text{ W}$, $\epsilon = 33 \text{ kV} = 3,3 \times 10^4 \text{ V}$ değerleriyle birlikte kütle kısıtına yerleştirirsek;

$M > 2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \times 2,82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \times 10^{10} \text{ m}^2 \times 5 \times 10^8 \text{ W} / (0,025 \times 3,3^2 \times 10^8) = 2,7 \times 2,82 \times 5 / (0,025 \times 3,3^2) \times 10^5 = 1,4 \times 10^7 \text{ kg}$ buluruz. Yani $M > 14$ bin ton!... Alüminyumun toplam hacmi $V > M / \rho_k = 1,4 \times 10^7 \text{ kg} / 2700 \text{ kg/m}^3 = 5.185 \text{ m}^3$ olur. Uzunluğu $L = 10^5 \text{ m}$ olduğuna göre, kesiti $A > 5.185 \text{ m}^3 / 10^5 \text{ m} = 0,05185 \text{ m}^2 = 518,5 \text{ cm}^2$ dir. Çapı ise; $A = \pi D^2 / 4$ ten, $D > (4A / \pi)^{1/2} = (4 \times 518,5 / \pi)^{1/2} = 25,7 \text{ cm}$!... Halbuki gerilimi, örneğin 380 kV'a çıkartırsak, kütle, hacim ve alan değerleri gerilimin karesiyle ters orantılı olduğundan; kısıtlar, $(33,3 / 380)^2 = 7,68 \times 10^{-3}$ faktörüyle azalarak $M > 107,5$ tona, $V > 39,8 \text{ m}^3$ e ve $A > 3,98 \text{ cm}^2$ ye iner. Telin çapı ise, $D > 2,25 \text{ cm}$ olur. Kabul edilebilir düzeyler... Ayrıca; kablo incelidikçe, ağırlığını taşıyan iletim hattı kulelerinin maliyeti de ona göre düşer. Dolayısıyla, uzun mesafe iletim hatlarında; hem iletim kayıplarını hem de şebekenin yatırım maliyetlerini en azda tutabilmek için, 765 kV'a varan yüksek gerilimler tercih edilir. Türkiye'deki üretim birimleri, çoğunlukla güney ve güneydoğuda, tüketim merkezleriyse kuzeybatıda olduğundan, iletim hatları uzundur. Bu yüzden, iletim kayıpları %3.1 düzeyinde ve %2.5 civarındaki OECD ortalamasının üzerinde.⁴ Mevcut iletim hatlarının yaklaşık 11.600 km'lik kısmı 380 kV, 25.000 km'lik kısmı ise 154 kV'luk olup, bu alandaki iyileşme 380 kV'luk iletim payının artırılmasıyla mümkündür.

Hız denetimi

Türbinin dönme hızı ayarı, 'denetçi' aracılığıyla yapılır. Denetçi, elektromekanik bir geri besleme düzeneğidir. Sistemin mekanik bileşeni temel olarak hele, 1785 yılında James Watt'ın, Newcome'un icat ettiği buhar makinasının hız denetimi için geliştirdiği 'uçan top'ları (flyball) kullanıyor. Şekilde görülen bu basit fakat etkili düzenekte, şaft üzerine 'kayar bir yaka' ile oturtulmuş bulunan top'ların dönme yarıçapı, şaftın dönme hızına



bağlı olarak ve merkezkaç kuvvetinin etkisiyle büyür ya da küçülür. Toplar böylelikle, bağlı bulundukları kolları, yukarı kaldırır ya da aşağıya indirir. Nihayet, bu kolların hareket ettirdiği yatay bir çubuk, çubuğun diğer ucundaki ve buhar kazanının üzerindeki bir kelebeğin açıklığını azaltıp çoğaltarak, kazanda üretilen buharın daha az ya da daha fazla bir kısmının dışarı salınmasını sağlar. Sonuç olarak; kazandan gelen buharın basıncı değiştiğinde, şaftın dönme hızı denetlenmiş olur. Günümüzdeki denetleyiciler, şaftın dönme hızını hele benzer bir düzeneğe algılıyor olmakla birlikte; bu bilgiyi doğrudan kullanmak yerine, elektrik sinyaline (artık sayısal) dönüştürdükten sonra, ilgili pnömatik elemanları kumanda edebilecek bir 'servomotor'a gönderiyorlar. Denetim işlevi için kullanılan veri, tabii ki yalnızca bundan ibaret değil. Çoğu denetleyici, bazıları şaft üzerine yerleştirilmiş olan 'algılayıcı'lerden (transducer) gelen bir düzineye yakın girdi ve bunun yarısı kadar çıktı sinyaliyle çalışır. Bu arada şaftın dönme

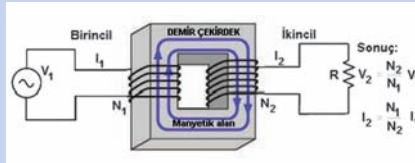
hızı yanında; alternatördeki sıcaklık, boru ya da kanallardaki basınç ölçümlerini alıp, o anki güç talebiyle arz arasındaki farkın düzeyini de hesaba katar. Ve bu verileri değerlendirerek; örneğin Pelton türbininde jetin çıkış ağzındaki mızrak ya da sapırcının hareketlerini, ya da Kaplan türbinlerinde kanat açılarını, ilgili pnömatik elemanlar aracılığıyla yönetirler. Ayrıca, sistemin aşırı salınımlar sergilemeye başladığı durumlarda, yük bağlantıyı kesip, sistemi güvence altına alacak şekilde programlanırlar.

Trafo merkezi

Büyük santrallarda çalıştırılan tipik bir jeneratörün, 33,3kV gerilimle, tümüyle dirençlerden oluşan bir grup yüke, 15kA akım sağlamakta olduğunu varsayalım. Jeneratör bu durumda, $P=500\text{Mw}=5 \times 10^8 \text{J/s}$ güç üretmektedir. Türbindeki mekanik güç %100 verimle elektrik gücüne dönüştürülüyor olsun. Gerçek değer %99'a yakındır. Türbinin sağlaması gereken torkun; dönme hızı $3000 \text{ devir/dk} = 50 \text{ devir/s} = 100 \pi$

Trafo

Bir trafo, yan yana duran, aynı demir çekirdek üzerine sarılmış iki bobinden oluşur. Yükseltici bir (step-up) trafoda, bu bobinlerden ikincisinin sarım sayısı birincisinden fazla, örneğin n katı kadardır. Birinci bobinden geçen AC akım, bu bobinde zamanla değişen bir manyetik akı üretmektedir. Bu akı ikinci bobinde, daha fazla sayıda sarım halkasının içinden geçmekte olduğundan, n katı kadar daha büyük bir akı oluşturur. Dolayısıyla, ikinci bobindeki toplam akının zamanla değişim hızı, birincidekinden n katı kadar daha büyüktür. Faraday yasası gereği, bu durum ikinci bobindeki gerilimin birincidekinin n katı kadar daha büyük olması anlamına gelir ($\epsilon = -N \cdot d\phi / dt$). Buna karşılık, ikinci bobindeki akım birincidekine göre n katı kadar azalır. Öyle olması gerekir zaten. Ki güç, $P=V \cdot I$, trafo kayıplarını da göz önünde bulundurmak kaydıyla, korunmuş olsun. Trafo, içi yağ dolu bir kutunun içine yerleştirilmiştir. Yağın amacı, hem güç aktarımında sorun yaratabilen nemi uzak tutmak,



hem de sıçramalara karşı, bobinleri kutu çeperinden yalıtmaktır. Trafolar da maliyeti ve ulaşılabilen gerilim düzeylerini belirleyen ana etken, bu yalıtım sorunu. 'Alçaltıcı' bir (step-down) trafoda ise, tam tersine, ikinci bobindeki sarım sayısı birincidekinden daha azdır. Bu yüzden, gerilimi yükseltmek yerine düşürürler. Trafoların ilk bakışta biraz gizemli görünebilen bu işlevi, bir bakıma dişli çarklarınkine benzer. Nasıl ki küçük bir çarktan, yarıçapı ve dolayısıyla da diş sayısı, varsayalım n katı kadar büyüğüne aktarılan tork n misli büyür ve fakat bu arada açısal hız da aynı oranda küçülürken, torkla açısal hızın çarpımı olan güç sabit kalıyorsa; burada da ona benzer şekilde. Ya da hidrolik bir benzetmeyle, hidrolik pompa ve asansörler gibi... İçi sıkıştırılamaz bir akışkanla dolu kapalı bir kabın yalnızca, biri diğerinin n misli geniş yüzey alanına sahip iki pis-

ton çıkışı varsa; küçük pistonu F kuvveti uyguladığımızda, basıncın akışkan içerisinde aynen dağılımı (Pascal Yasası) gereği, büyük pistonun yüzeyinde F'nin n katı kadar bir kuvvet oluşur. Fakat buna karşılık, büyük kuvvete d kadar yol katettirebilmemiz için, küçük kuvvetin uygulama noktasını d'nin n misli kadar hareket ettirmemiz lazımdır. Yani güç ve enerji korunur. Trafoların bu, dişli çarklara ya da hidrolik pompalara benzeyen basit ve maliyeti düşük yapısı nedeniyledir ki, AC gerilimi yükseltip alçaltmak, bu işlemi DC gerilimle yapmaya oranla çok daha kolaydır. Gerçi şimdi artık DC gerilimi, trafoların AC'de yaptığı gibi, yüksek verimle değiştiren 'katı hal' aygıtları var. Fakat geçen yüzyılın başlarında bu teknoloji yoktu. Edison'un şirketi DC güç dağıtmaya başlamışken, Tesla'nın geliştirdiği AC gerilimin rakip Westinghouse şirketi tarafından benimsenmesi üzerine iki şirket arasında patlak veren 'akım savaşları'nın AC'nin zaferiyle sonuçlanmış olmasının ana nedeni buydu. Prizimize elektrik böyle gelir. Sektöre emeği geçen isimsiz kahramanlara saygıyla...



rad/s olduğuna göre; $P = \omega T$ ilişkisinden, $T = (5 \times 10^8 \text{ J/s}) / (100\pi \text{ rad/s}) = 159 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (kilo Newton-metre) olması gerekir. Kanatların ortalama uzunluğu $L = 30 \text{ cm}$ olsa, üzerlerinde $F = T/L = 159/0.3 = 530 \text{ kN}$ kuvvet var demektir; yani 54 ton kütleli ağırlığı... Emre amade 500 MW'la; bir konutun günlük elektrik enerjisi tüketimi 2,5-3,5 kWh olmakla birlikte, maksimum güç gereksinimi 2,5-3,0 kW kadar olduğundan, diyelim 2'şer kW'tan 250.000 konuta elektrik gücü sağlanabilir. Ancak, santraller güvenlik ve çevre gerekçeleriyle, yerleşim birimlerinden uzakta ya da taşınması güç olan enerji kaynaklarının yakınında kurulur. Ayrıca, potansiyel tüketiciler farklı yerleşim merkezlerinde yaşadığından, gücün her birinin ayağına kadar iletilmesi gerekir. Öte yandan, belli bir gücün iletimi sırasında yolda karşılaşılan kayıplar, gerilimin tersiyle azalır. Dolayısıyla, iletim kayıplarının en azda tutulabilmesi için, önce jeneratör çıkışındaki 33,3 kV'luk gerilim; 380 ya da 765 kV, hatta 1 mil-

yon volta varan 'çok yüksek' düzeylere yükseltilir. Bu işlem, santral çıkışındaki 'ana trafo istasyonu'nda yapılır (Bkz. Trafo). Ondan sonrası, birden fazla koldan yola çıkan 'yüksek gerilim ağı'...

İletim, Dağıtım

Elektrik iletim ağı, hiyerarşik bir yapıya sahiptir. İletim mesafesi yüzlerce kilometreyi bulur. Hatlardaki gerilimin düzeyini plastik yalıtımla, canlıların temas halinde zarar görmeyecekleri düzeylere indirmek, ekonomik açıdan olanaksız. Dolayısıyla, hatların çıplak olarak kullanılması zorunluluğu var. O halde bu çıplak hatların, karayla temas halindeki canlıların erişiminden, olabildiğince uzak tutulması gerekir. Hatlar bu yüzden, normalde ulaşamayacak yükseklikteki direklerin üzerinden çıplak olarak iletilir. Talep edilen güç düzeyi arttıkça, direnç kayıplarının yol açtığı ısınma nedeniyle hatlar uzar ve direkler

arasındaki kısımlar, aşağıya doğru daha fazla sarkar. Cıvardaki engellere değmemeleri için, direkler arası mesafe kısa tutulur; 100-300 metre kadar. Bitki örtüsüyle kaplı bir alandan geçiyorsa eğer, hatta doğru büyüyen ağaçlar, düzenli olarak budanır.

Ağın belkemiğini, 'yüksek gerilim' (YG) ağı oluşturur. Bu ağın değişik kısımları farklı gerilimlerle çalışıyor olabilir. Yüksek gerilim hatlarını taşıyan direklerin genellikle üç ya da iki kolda üçerden altı, hatta altışardan on iki hat bile taşıdığı görülür. Bunlar üçerli faz hatlarıdır. Ayrıca bir nötr hat, direklerin en tepesinden uzanmaktadır. Direklerden aşağıya indirilen iletken uzantılarla topraklanmış olan bu sonuncu hattın görevi, yıldırım düşmesi halinde, enerjiyi toprağa aktararak, altındaki faz hatlarını korumaktır. YG ağının amacı, 'orta gerilim' (OG) taşıyan bölgesel ağları beslemektir. İlettiği yüksek gerilim, OG ağlarının giriş noktalarını oluşturan YG/OG trafo istasyonlarında, 100 kV civarındaki, örneğin 66 kV ya da 132 kV'luk OG düzeylerine indirilir. OG ağları, ortalama 100 MW civarındaki güç taşıma kapasiteleriyle, 'alçak gerilim' (AG) ağlarını besler. İlettikleri orta gerilim, AG ağlarının giriş noktalarını oluşturan OG/AG trafo istasyonlarında, 3,3-33 kV arasındaki AG düzeylerine indirilir. Tüketim merkezlerine artık yaklaşmış demektir ve ortalama 10 MW civarında güç taşıyabilen AG ağları bu gücü, mahalle aralarında gördüğümüz, eskiden yeşil boyalı iken artık minik birer evmiş görünümlü verilen metal kaplı küçük odalardan oluşan yerel 'alt trafo istasyonları'na dağıtır. Bu yerel istasyonlarda AG, dağıtımın son aşamasındaki küçük ölçekli tüketicilere iletmek üzere, 220 V'a indirilir. Bu sonuncu işlem, yerel dağıtımın havadan yapıldığı yerlerde bazen sokak aralarında gördüğümüz elektrik direklerinin bazılarının altında bulunan kutuların içindeki alçak gerilim trafolarında gerçekleştiriliyor da olabilir (Bkz. Trafo).

Prof.Dr. Vural Altın



Dipnotlar

¹ TEİAŞ

² TEDAŞ

³ http://www.hitachi.com/rev/1998/revoct98/r4_104.pdf

⁴ Elektrik Enerjisi Sektörü, DEK-TMK, 2004.