

TRANSFORMATÖR*

John W. COLTMAN**

Çeviren: F. Levent DEĞERTEKİN***

Bu gösterişsiz aygıt tam 100 yıl önce elektrik enerjisinin dağıtımına olanak sağladı. Çağdaş yaşamın birçok ögesinin ona dayanmasına rağmen, o halâ teknolojinin isimsiz kahramanlarından biridir.

Geçen yüzyılda uygarlığı şekillendiren teknolojik devrim iletişim, ulaşım ve elektrik gücünde meydana gelen temel gelişmelerden doğmuştur. Buluşçuların iletişim ve ulaşım alanlarındaki son başarıları -Telefon, televizyon, otomobil, uçak vb.- artık günlük yaşamın değişmez parçaları olmuştur. Buna karşılık elektrik enerjisinin her yerde kullanılmasını sağlayan buluş, yaşamlarına girmiş olduğu kişilerce halâ farkedilmemiştir. Bu aygıt hareket etmez, hemen hemen tümüyle sessizdir, ve genellikle yeraltı depolarında veya perde arkasında saklanır.

19. yüzyılda geliştirilmiş bu yetenekli aygıt transformatördür. Transformatör çağdaş elektrik güç sistemlerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Kısaca işlevi, düşük akımlı yüksek gerilimli elektriği, hemen hiç enerji kaybı olmaksızın yüksek akımlı düşük gerilimli duruma (veya tam tersi) dönüştürmektir. Bu dönüşüm önemlidir, çünkü elektrik enerjisi en verimli şekilde yüksek gerilimle iletilirken, düşük gerilimlerde kullanılır ve üretilir. Eğer transformatörler olmasaydı üreticilerle tüketici arasındaki mesafenin en aza indirilmesi hedeflenecek, birçok yerleşim ve endüstri merkezlerinin kendilerine ait güç istasyonları kurmaları gerekecek ve elektrik çok daha az kullanışlı bir enerji kaynağı olacaktır.

Elektrik güç sistemlerindeki rolüne ek olarak, transformatörler elektrikle çalışan birçok aracın tamamlayıcı elemanıdır. Masa lambaları, pil şarj araçları, oyuncak trenler ve televizyon gibi aygıtların hepsinde gerilimi ayarlamak için transformatör kullanılır. Pek çok kullanımlarında transformatörün boyutları bezelye iriliğinde küçük olabildiği gibi, 500 ton ağırlığında olanları da vardır. Bu makalenin odağı güç sistemlerindeki transformatörler olacaktır, ancak elektrik transformatörlerinin ilkelerinin boyuttan ve uygulamadan bağımsız olarak aynı olduğunu da vurgulamak gerekir.

Transformatörün temel işlevini 1831'de elektrik alanında ilk çalışmaları yapmakta olan İngiliz fizikçi Michael Faraday bulmuştur. Elli yıl kadar sonra çağdaş örneğinin gerekli tüm elemanlarına sahip, kullanışlı transformatörün ortaya çıkmasıyla da o zaman henüz yeni olan elektrikle aydınlatma endüstrisinde devrim olmuştur. Yüzyılın sonlarında değişken akımlı (a.c.) güç sistemleri tüm dünyada kullanılmaya başlamış ve transformatörler elektrik iletim ve dağıtımında anahtar rolünü üstlenmişlerdir.

Ancak transformatörün öyküsü 1900'de bitmez. Bugünün transformatörleri yüzyıl başındaki atalarına göre güç bakımından 500, gerilim bakımından 15 kat fazla kapasiteye sahiptir. Güç birimi başına ağırlık 10 kat azalmış ve verimlilik genellikle %99'u aşmıştır. Bu gelişmeler kuramsal çalışmaların ve mühendisliğin birleşmesiyle ortaya çıkmıştır.

Faraday'ın çalışmaları, 1820'de bir iletkenin geçen elektrik akımının, iletken etrafında manyetik alan yarattığını göstermiş olan Danimarkalı fizikçi Hans Cristian Oersted için ilham kaynağı olmuştur. Oersted'in bu keşfi o zaman için çok önemlidir, çünkü bu olaya kadar elektrik ve manyetizma birbiriyle ilgisiz kuvvetler olarak bilinmekteydi. Elektrik akımı manyetik alan üretebiliyorsa bir manyetik alan da elektrik akımına yol açabilirdi.

1831'de Faraday manyetik alanın bir iletkenle akım endüklebilmesi için alanın değişken olması gerektiğini gösterdi. Faraday, alanın değişmesini, alanı yaratan elektrik devresini açıp kapayarak sağlıyordu; aynı etki, yönü zamanla değişen bir akımla da sağlanabilirdi. Elektrik ve manyetizmanın bu büyüleyici etkileşimi elektromanyetik endüksiyon olarak bilinir.

Endüksiyon en iyi şekilde Faraday'ın bir manyetik alanın yönünü ve kuvvetini anlatmak için ortaya attığı kuvvet çizgileri yoluyla anlaşılabilir. Çember şeklinde sarılmış bir telden geçen akımın yarattığı manyetik alan için çizilmiş kuvvet çizgileri şekil 1'de görülmektedir. İlkinden bağımsız ikinci bir tel döngü değişken bir manyetik alan içine konulduğunda, döngüde içine aldığı kuvvet çizgilerinin zamana göre değişimiyle orantılı bir gerilim oluşur. Yapılan bobin iki sarımlıysa, böyle bir etkileşim her sarımda meydana gelir ve sonuçta gerilim iki katına çıkar; üç sarım varsa gerilim üç katına çıkar ve bu durum sarım sayısı ile gerilim arasındaki doğru orantıyı gösterir. (Gerilim yükleri hareket ettiren basınç, akım da yüklerin akma oranı olarak düşünülebilir. Bunların çarpımı-gerilim volt, akım amper birimiyle-watt olarak elektriksel güce eşittir.)

Bir transformatörde akımla beslenen ve manyetik alanı üreten sarıma birincil ("primary") adı verilir. Manyetik alanı tutan sarıma da ikincil ("secondary") denir. Birincil ve ikincil sarım arasında karşılıklı endüksiyon vardır; yani ikincil

* Özgün Metin: The Transform». Scientific American, Ocak 1988. Cilt: 258, No:1.

** Westinghouse Electric Corporation Araştırma Laboratuvarları, eski Araştırma ve Geliştirme Yöneticisi

*** O.D.T.U Elektrik ve Elektronik Müh. Böl. 4. sınıf öğrencisi

sarımda akan akım birincilde bir gerilim endüklerken, aynı yolla birincil de ikincil sarımda gerilim yaratır. Ayrıca, birincil sarım kendi kuvvet çizgilerini de içine aldığından kendi üzerinde de gerilim endükler, bu olay öz-endüksiyon ("self-induction") olarak bilinir ve ikincil sarımda da meydana gelir.

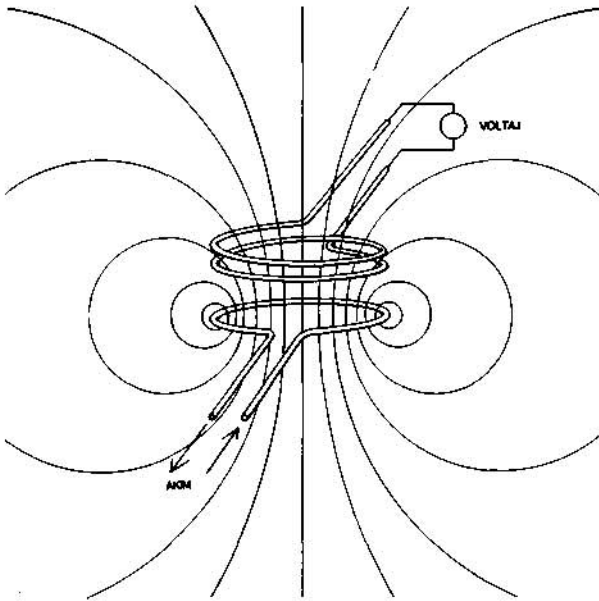
Aynı anda sarımlar arasında oluşan karşılıklı endüksiyon ("Mutual-induction") ve her sarımda olan öz-endüksiyon görüngüleri transformatör işlevinin can alıcı noktasını oluşturur. Bir güç transformatörünün görevini yapabilmesi için sarımların kusursuz şekilde eşleşmiş olmaları ve her birinin yüksek öz-endüksiyona sahip olması gerekir. Yani birincil sarımın bütün kuvvet çizgilerinin ikincil tarafından da çevrelenmesi ve belli bir akım değişikliğine karşılık üretilen kuvvet çizgilerinin sayıca fazla olması gerekir. Her iki şart da Faraday'ın ilk deneylerinde yaptığı gibi birincil ve ikincil sarımları demirden yapılmış bir çekirdek etrafına sararak sağlanabilir. Demir, üretilen kuvvet çizgilerini 10000 kat artırabilir, bu özelliğe geçirgenlik ("permeability") denir. Demir ayrıca, kuvvet çizgilerini birarada tutarak birincil ve ikincil sarımların birbirlerinden uzak olmalarına rağmen manyetik olarak iyi bir şekilde eşleşebilmelerini sağlar.

İdeal transformatörde bütün kuvvet çizgileri birincil ve ikincil sarımlarından tek tek geçer ve değişken bir manyetik alan sarımların her birinde aynı gerilimi üretir, bir sarımda üretilen gerilim sarımdaki döngü sayısı ile orantılıdır. Transformatörde enerji kaybı yoksa ikincil sarımdan elde edilen gücün birincile verilene eşit olması gerekir; başka bir deyişle ikincil sarımın akım gerilim çarpımının birincildeki akımla gerilimin çarpımına eşit olması gerekir. Bu nedenle iki sarımdaki akımlar gerilimlerle ters orantılı olmalıdır. (Güç ifadeleri ancak akım ve gerilimler aynı fazda ise doğrudur, yüksek öz-endüksiyon şartı aynı fazda olmayan akımların ihmal edilebilir büyüklükte olmasını sağlar).

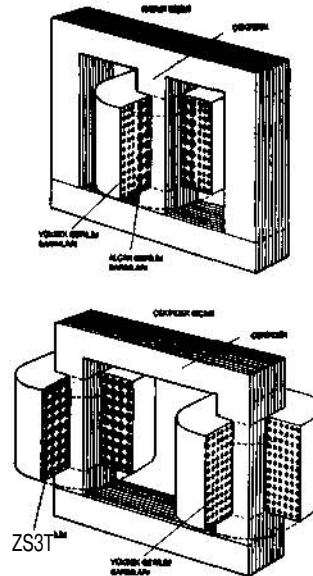
Böyle bir ideal transformatör elektrik mühendisine mekanikteki kaldıraça benzer bir araç olur, fakat kaldıraçtaki kuvvet ve hareket dönüşümü yerine transformatör gerilim ve akımla ilgilenir. Kaldıraç kolunun uzunlukları yerine, sarım sayısı oranı bu aracın etkili ölçütüdür. Doğal olarak ideal transformatör henüz yapılmamıştır, ancak uygulamada ideale çok yaklaşmıştır. Demir çekirdekler bütün güç transformatörlerinin ayrılmaz parçalarıdır ve geçmişte olduğu gibi günümüzde de düşük direnci nedeniyle bakır, sarımlarda kullanılan en yaygın malzemedir.

Bugünün elektrik mühendisi için işin abecesi sayılan ideal transformatör bağlantıları, ilk deneyler tarafından kesinlikle açık olarak bilinmiyordu. Onların çalıştıkları düzenlemeler idealden çok farklıydı; kötü şekilde eşleşmiş sarımlar, saf olmayan demir çekirdekler, öz ve karşılıklı endüksiyon gibi nedenlerle çok karmaşık ve garip durumlarla karşılaşılıyorlardı.

Faraday, çalışmalarını daha fazla ilerlemeden bıraktı ancak diğer buluşçuların onun bıraktığı yerden devam edecekleri açıktı. Gerçekten de birkaç on yıl transformatör benzeri aygıtlarla kimse uğraşmadı. Demir bir çekirdek etrafına tek bi



Kuvvet çizgileri, akım taşıyan tel sarımdan (birincil) yayılan manyetik alanı göstermektedir. Alana yerleştirilen ikinci bir sarım (ikincil) çizgileri alır; manyetik alan birincil sarım değişken akımla beslendiğinde olduğu gibi değişmeye başlarsa, ikincil sarımda gerilim indüklenir. Elektromanyetik indüksiyon olarak bilinen bu görüntü transformatör işlevinin temelini oluşturur.



iki transformatör tasarımı, çekirdek ve bağlantı yapısı için değişik girişimleri gösterir. Her iki çekirdek de demir levhalardan yapılmıştır. Çekirdek tipi denilen soldaki tasarımda, birincil bobin çekirdeğin bir kolunu sararken ikincil diğerini kaplar. Sağdaki kabuk tipi çekirdek E şeklindeki tabakalardan oluşturulmuştur ve birincille ikincil sarımlar orta çubuk üzerine birlikte sarılmıştır. Üç fazlı transformatörlerde sarımlar her üç çubuk üzerine yerleştirilmiştir.

tel sararak yapılan bobinlerle ilgili deneylerin nedeni sadece sarımdaki akım kesildiğinde ortaya çıkan kıvılcımlardı. Bu deneyleri yapanlar arasında indüksiyon birimine adını veren Amerikalı Joseph Henry de vardı.

Deneylerin bu aşamasında metal çekirdeklerde dolaşan akımın enerji harcadığı kesinlik kazandı. "Eddy akımları" denilen bu kayıpları azaltmak için transformatör içindeki manyetik kuvvet çizgilerine dik doğrultuda iletken olmayan çekirdekler üretildi. Bu tip çekirdeklerde düz demir tel demetleri kullanılıyordu.

Bu süre içinde yapılan bütün deneylerde kaynak olarak doğru akım bataryaları kullanılıyor, gerekli değişken akımı üretmek için birincil devre açılıp kapatılıyordu. 1860'larda yine Faraday'ın öngörüsüne dayanan bir çeşit üreteç olan dinamonun ortaya çıkışıyla değişken akım kolayca elde edilebilir hale geldi. Bir transformatörü değişken akım kaynağına bağlayan ilk kişi, laboratuvarında yüksek gerilimli güce ihtiyacı olan William Grove oldu. Çok açık bir ticari uygulaması olmamasına rağmen, bu düzenlemeye Thomas Edison 1880'lerde elektrikle aydınlatma düşüncesini ortaya atana dek kimse gerekli önemi vermedi.

Edison bu uygulamayı başlattığında platin filamentli ampuller, akımın filament yerine iki elektrot arasında ark yaptığı ark lambaları zaten kullanılıyordu. Her iki çeşit lamba da görevini yapıyordu, ancak elektriksel özellikleri birbirlerine bağlanmaları konusunda bazı güçlükler çıkarıyordu. Öncelikle lambalar seri olarak bağlanmalıydılar ki bu durumda sistemdeki bütün lambaların aynı anda yanıp sönmeleri gerekiyordu.

Böyle bir düzenleme sokak aydınlatması için uygun olmasına rağmen, ayrı ayrı lambaları isteğe bağlı olarak açık kapayamamak ve çok sayıdaki lambanın seri bağlanması halinde ortaya çıkan yüksek gerilimler, ev ve küçük yerleşim birimleri için sorun yaratıyordu. Diğer taraftan her lambanın kendi alt devresi içinde çalıştığı paralel sistemler ise o günün düşük dirençli yüksek akım gerektiren lambalarını beslemek için çok fazla bakır kablo gerektirdiğinden kullanılmıyordu. Edison'un bu alandaki asıl katkısı paralel bağlamayı pratik hale getiren yüksek dirençli karbon filamentli lambayı bulması olmuştur. Edison karbon filamentli lambalar ve bir doğru akım üretici kullanarak ilk ticari ışıklandırma sistemini 1882'de New York'da kurmuştur.

Yaklaşık olarak aynı zamanda transformatörler ilk defa İngiltere'de elektrikli ışıklandırma sisteminde kullanılmıştır. Bir Fransız buluşçu olan Lucien H.Gaulard ve İngiliz girişimci John D.Gibbs değişken akımlı ark-ışıklandırması sistemine akkor lambalar eklemek için bir çeşit transformatör kullandılar. Ark lambaları hattın belli bir akım geçecek şekilde seri bağlandıkları için, transformatörlerinin birincilini de zorunlu olarak ark lambalarına seri bağladılar. Gaulard ve Gibbs ikincil üreteç adını verdikleri bu aygıtın patentini aldılar ve sistemlerini 1883'de İngiltere, 1884'de İtalya'da uyguladılar. İkincil üreteç pek fazla kullanım alanı bulamadı ancak diğer buluşçular arasında birçok düşüncenin oluşmasına yardımcı oldu.

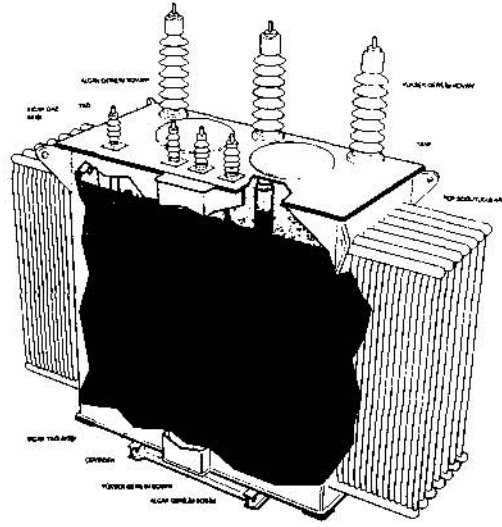
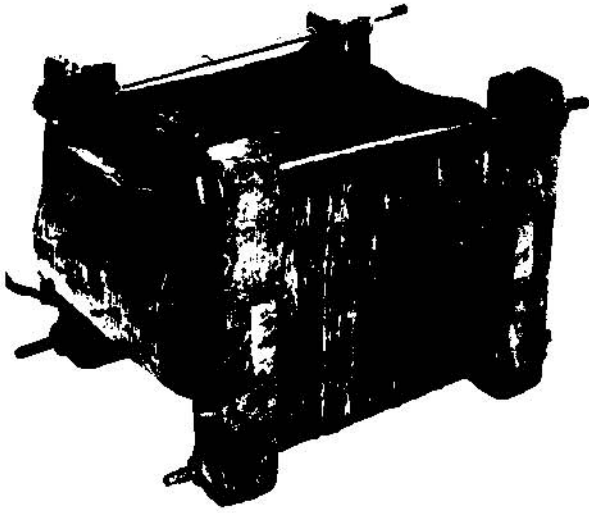
Gaulard ve Gibbs'in çalışmalarıyla ilgilenenler arasında Budapeşte'deki "Ganz and Company" şirketinden üç mühendis de vardı. Bunlar İtalya'daki uygulamayı izlemişler ve seri bağlamanın dezavantajlarını farketmişlerdi. Max Dèri, Otto T.Blàthy ve Kari Ziperovski adlı bu mühendisler Budapeşte'ye döndüklerinde üreteçlere paralel bağlanabilen birkaç çeşit transformatör yaptılar. Bu transformatörler paralel bağlamaya, açık uçlu demir demetlerden çok daha uygun kapalı çekirdekler kullanılarak iki türde yapılmışlardı. Birinde iletkenler toroid bir demir çekirdek etrafına sarılmış, diğerinde ise demir çekirdeği oluşturan teller toroid şeklinde sarılmış iletkenlerin çevresine dolanmıştı.

1885 Mayıs'ında Budapeşte'deki Macar Ulusal Sergisi'nde Dèri, Blàthy ve Ziperovski bugünün ışıklandırma sistemlerinin ilk örneğini sergilediler. Bu sistem, 1350 volt gerilim üreten bir değişken akım üretici kullanıyor ve 75 transformatörün parrel bağlanmasıyla 1067 akkor Edison lambasına güç sağlıyordu. Transformatörler toroid şeklindeki demir çekirdek etrafına iletken sarılarak yapılmıştı. Pahalıya mal olmalarına karşın tasarlanma amaçlarına, yani düşük gerilimli lambaları yüksek gerilim dağıtma sistemiyle çalıştırmayı başarıyorlardı.

George Westinghouse adlı Amerikalı da Gaulard ve Gibbs'in gösterilerinden etkilenmişti. Westinghouse 1880'lerde endüstrideki yerini almıştı ve aydınlatma amaçlı doğal gaz dağıtımıyla ilgileniyordu. Edison'un başarısından sonra elektrikle de ilgilenmeye başladı ancak sistemin uygulanabilirliğinden emin değildi. Kuşkuculuğu boşuna değildi; paralel bir sistemde artan yük artan akım demektir ve bir şehir kadar büyük bir yük çok fazla akım çekecekti. Fakat yüksek akımda güç iletimi verimsizdi, bu nedenle ya çok geniş çaplı bakır kablolar kullanmak veya üreteçleri yüklere çok yakın yerlerde kurmak zorunluuydu.

Yüksek gerilimde gücün verimli iletimi, göreceli olarak daha ince kablolarla da mümkündü ve birçok insan elektrik enerjisini kullanım noktasındaki gerilimden daha yüksek gerilimlerde iletmenin yollarını arıyordu. Westinghouse 1884'de bu problemi transformatörle çözmek düşüncesinde olan genç bir mühendise, William Stanley'e görev verdi. Bu mühendis Gaulard ve Gibbs'in çalışmalarını duyunca Westinghouse'u transformatör patentleri alma konusunda cesaretlendirdi. Paralel bağlamanın üstünlüğüne inanan Stanley, 1885 yılının yazında bazı kapalı çekirdekli transformatörler tasarlamış bulunuyordu.

Kısa bir süre sonra sağlık problemleri nedeniyle, Stanley Pittsburgh'un kirli atmosferinden uzaklaşmak zorunda kaldı. Westinghouse'un yardımıyla Massachusetts'de Great Barrington'a giderek transformatörler üzerinde çalışmalarını sürdürdü. Bu arada paralel bağlamanın yararına inanmayan Westinghouse da elektrik mühendisliğinde başka bir önder sayılabilecek Oliver. B.Shallenberger'le Gaulard ve Gibbs'in ikincil üreteçleriyle ilgili deneyler yapıyordu.



Massachusetts'te Great Barrington'daki ilk değişken akım güç merkezindeki Stanley transformatörü 1885'ten kalmıştır. Transformator yaklaşık bir ayak uzunluğundadır; bakır teller soldaki tahta parçalar arasında pamukla sarılmıştır. E şeklindeki demir tabakaların orta kolu, önceden sarılmış bobine değişik yönlerde sokulmuştur. Diğer iki kolun uçları tabakaların altında ve üstünde yoğun bölgeler olarak görülmektedir.

Çağdaş transformatörün tipik örneği yalıtım ve soğutma için yağa batırılmış ve hava geçirmez bir tanka konmuştur. Alçak ve yüksek gerilim hatları bobinlere seramik kovanlardan geçerek bağlanmıştır. Transformatörün içindeki bobinler ve çekirdek elektrik kayıplarını ve malzeme maliyetini azaltmak için yakın bir şekilde yerleştirilmiştir. Yağ soğutucuları dış radyatörde ısı taşınma yoluyla dolaşır. Büyük transformatörlerde soğutma, radyatörlere vantilatör bağlanarak ve yağı pompalayarak yapılır.

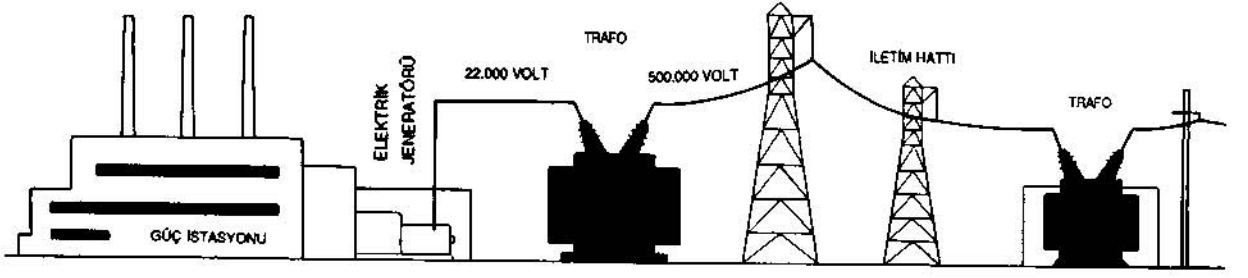
1885 Aralığında Stanley, Westinghouse'u ikna edecek kadar gelişme göstermişti. Bunun üzerine Shallenberger ve başka bir parlak mühendis olan Albert Schmid'in yardımıyla Stanley'in transformatörünü daha kolay üretilecek şekilde geliştirmeye koyuldular. Bobin çekirdekleri H harfi şeklinde kesilmiş ince demir levhalardan yapılmıştı. Yalıtılmış bakır bobinler H harfinin orta çizgisi etrafına sarılmış ve şeklin uçları ayrı birer demir bantla kapatılmıştı. Stanley, bu şeklin E harfine dönüştürülerek hazır sarılmış bobinlerin şeklin açık uçlarına takılmasını önerdi. E şeklindeki demir çekirdekler değişik doğrultularda bobinlere sokuluyor ve şeklin açık kalan uçları birleştirilerek manyetik devre tamamlanıyordu. Bu yapım şekli bugün de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Westinghouse Elektrik Şirketi transformatörlerle ilgili ilk patentini 1886'da aldı. Bundan sonraki birkaç ay içinde aynı grup önceden sarılmış bobinlerin demir çekirdeklere yerleştirilmesi, transformatörün yağa batırılarak ve havasız bir kutu içine konarak soğutulması ve yalıtılmasıyla ilgili patentleri de aldı. Stanley, Great Barrington'da birkaç transformator üretti ve 500 voltluk bir sistem kurarak laboratuvarından bir mil uzakta olan kente elektrik dağıtmayı başardı. Uzak mesafelere verimli iletim yapabileceğini göstermek için elde ettiği elektriği ilk önce transformatörlerin yardımıyla 3000 volta çıkarıyor daha sonra 500 volta indirerek kente gönderiyordu Sistem 16 Mart 1886'da tamamen devreye girdi ve çok başarılı sonuçlar verdi.

Edison ve yandaşları değişken akım sistemine karşı hem adalet hem de basın önünde mücadele ettiler ancak onlarınki daha baştan kaybedilmiş bir kavgaydı. Nikola Tesla tarafından yapılan çok fazlı motor, değişken akımdan yararlanmak için önemli bir olanak yarattı. Shallenberger'in "değişken akım wattsaat ölçeri"ni icat etmesiyle müşterilerin enerji kullanımının doğru şekilde fatura edilmesi sağlandı. Bu iki buluş değişken akımın birkaç özel uygulama dışında her alanda kullanılmasına olanak verdi.

Bundan sonraki on yıl 1893 Chicago Dünya Fuarı'nın ışıklandırılması ve ilk ikisi 1895te servise sokulan Niyagara Şelaleleri'ndeki 5000 beygir gücünde hidroelektrik santrallerin yapılması gibi başarılarla göze çarpan, değişken akım sistemlerinin hızlı yükselişine şahit olundu. Elektrik enerjisi üretimindeki bu sersemletici büyüme, transformatörleri de etkiledi. 1895'te Niyagara'da bir şirket bir fırında kullanılmak üzere 750 kva gücündeki ilk transformatörü üretti. Bundan beş yıl sonra 2000 kva gücünde 50.000 volt gerilimde çalışabilen transformatörler yaygın olarak kullanılıyordu.

19. yüzyılın sonlarında üretilen transformatörlerin tamamen gelişmiş aygıtlar olduğu iddia edilebilir; aygıtın gerekli parçaları bugüne kadar değişmemiştir. Ancak gerçekte transformator gelişimine devam etmiştir. Halâ soğutulan ve



yalıtılmış demir levhalardan ve bakır bobinlerden oluşan bir aygıt olmasına rağmen transformatörün performansı 1900'lerden bugüne önemli ölçüde gelişmiştir. Çağdaş transformatörler 765 kvolt gerilimde çalışmakta ve 1 milyon kva güç taşıyarak 25-40 yıl boyunca kullanılabilirlerdir.

Bu gelişmeler, hızlı büyümesi endüstrideki elektrik kullanımıyla ilgili olan, endüstriyel araştırmaların sonucudur, endüstriyel araştırma çalışanları, en az maliyetle en yüksek performansı ödüllendiren yarışma sistemiyle desteklenerek, yeni ürünler geliştirmek ve eskileri yenilemek için doğal görüngüleri anlamaya çalışmaktadırlar. Rekabet, kullanılan malzemelerin getirdiği sınırlamaları ortadan kaldırmak için gerekli itici gücü sağlarken, bir yandan da gelişmiş malzeme ve kuramlarla daha iyi tasarımlar ve fabrikasyon yöntemlerinin ortaya çıkmasına olanak tanımaktadır.

İdeal transformatörü belirleyen ölçütler büyük oranda çekirdeğin özelliklerine dayanır ve en önemli gelişmelerin olduğu bölüm de burasıdır. Çekirdek malzemesinin önemli özellikleri geçirgenlik, doyum ("saturation"), direnç ve ardılizlem ("hysteresis") kayıplarıdır. Geçirgenlik, yukarıda da değinildiği gibi verilen bir manyetik etki karşılığında maddede oluşan kuvvet çizgilerinin sayısı ile ilgilidir. Doyum, maddenin dıştan gelen bir manyetik kuvveti yükseltme yeteneğinin bir düzlüğe eriştiği noktayı göstermek için kullanılır. Bu iki özellik çekirdeğin kullanılabileceği gücü belirler. Elektrik direnci eddy akımlarına bağlı enerji kayıplarını azalttığı için çekirdek maddesinde aranan bir özelliktir.

Buna karşılık ardılizlem, yani manyetik maddelerin "bellek etkisi", transformatörün verimini kötü yönde etkileyen bir özelliktir. Manyetize olmuş atom grupları arasındaki etkileşimler, manyetizmanın maddede "kalma" eğilimi nedeniyle manyetik alan azaldığında da devam etmekte ve madde manyetik değişikliklere istenen tepkiyi göstermemektedir, transformatördeki bu gecikme değişken akımın her devrinde boşa enerji harcanmasına neden olmaktadır. Çekirdek gelişiminin tarihinde mühendislerin hedefi geçirgenliği, doyumunu ve direnci artırırken ardılizlem kaybını azaltmak olmuştur.

Bu yöndeki araştırmalar sırasında kullanılan en önemli araçlardan birisi, manyetize olmuş bir malzemede geçirgenlik, doyum ve ardılizlem arasındaki ilişkiyi grafik olarak belirleyen B-H eğrisidir. Bu eğride, bir maddede indüklenmiş kuvvet çizgileri (B), değişen manyetizma kuvvetinin (H) fonksiyonu olarak çizilir. İki ucu kapanmış geniş bir S harfini andıran bu eğri transformatörü süren değişken akımın her devrinde aynen izlenir. Grafiğin eğimi geçirgenliği, düzleştiği nokta-yani S harfinin tepesi-doyum değerini ve eğrinin alanı da ardılizlem kaybını gösterir.

Bilim adamlarının hedefi bu özelliklerin demirin fiziksel yapısıyla olan ilişkisini açığa çıkarmak olmuştur. Her özellik şu ya da bu şekilde demirin kristal yapısı, başka elementlerin karışması ve çeşitli kusurlardan etkilenen atom grupları arasındaki etkileşimlere bağlıdır. Bu karmaşık ilişkilerin incelendiği kurama bölge kuramı ("domain theory") denir. Bu kuramın çıkarımları araştırmacılara daha iyi transformatör malzemesi yapımında yol gösterir.

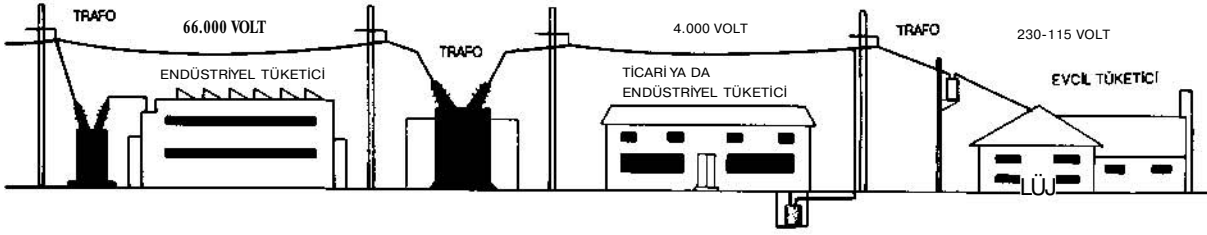
İnce dövülmüş demir levhalardan yapılmış ilk Stanley-Vestinghouse transformatöründe önemli miktarda ardılizlem kaybı vardı. Bu kayıplar, demirin belli üretim kaynaklarından sağlanmasıyla 1900'lerde yarı yarıya azaltıldı. Malzemenin yaşlanması da ayrı bir problem oluyor, transformatör yaşlandıkça kayıplar artıyordu.

1900'lerin başında İngiliz malzeme bilimcisi Robert A. Hadfield, demirin özelliklerinin başka madde eklenerek nasıl değiştirilebileceğini anlamak için uzun bir deneysürecini başlattı. Bu deneyler sonucunda Hadfield ve meslektaşları bazı yazılarında çekirdek malzemesi olarak silikonlu demir kullanmaktan söz ettiler. Demire silikon eklenmesiyle ardılizlem kayıpları azalıyor, geçirgenlik artıyor, yaşlanma etkisi ortadan kalkıyor ve elektriğe olan direnç yükseliyordu. Ancak silikon katkılı demir üretimi zor bir işlemdi ve Hadfield'in şirketi bile silikonlu demirden yapılmış ilk transformatör levhalarını ancak yedi yıl sonra piyasaya sürebildi. Bundan sonraki 17 yıl içinde silikonlu demir, elektrik endüstrisinde 1920'lerde 340 milyon dolar gibi büyük miktarda tasarruf sağladı.

Çekirdek teknolojisinde ikinci atılım Amerikalı metalürjist Norman P. Goss'un 1930'larda ısı altında ve çekerek yapılan silikonlu demir tabakaların çekme yapılan doğrultuda dikkati çeken manyetik özellikleri olduğunu bulmasıyla başladı. Bu işlemin etkisiyle demir kristallerinin asıl eksenleri aynı yöne dönüyor ve birbirini destekler şekilde manyetik etkileşimlere neden oluyordu. Çekirdeği bu malzemedan yapılmış bir transformatörde doyum noktası %50 yükseliyor, ardılizlem kayıpları dört kat azalırken geçirgenlik beş kat artıyordu.

Bu buluşun uygulamaya geçirilmesi de çok zorlu ve uzun çabalar sonucunda gerçekleşti. Westinghouse Electric Co. ile American Rolling Mili şirketi bileşerek bir grup oluştururken General Electric Co. ve Allegheny Ludlum Steel şirketi de birleşerek başka bir birlik kurdular, ve hemen bu yeni işlemde yararlanmanın yollarını aramaya başladılar. Bu iki grup arasında karşılıklı bilgi alışverişinin sağlanmasıyla uygulamaya geçişte kısa zamanda gelişme kaydedildi.

Çekirdeği oluşturan metalin özel bir şekilde yönlendirilmesi zorunluluğu, çekirdek üretiminde önemli değişiklikler



getirdi. Artık demir levhalardan yapılmış basit bir E şekli yeterli olmuyordu; en iyi sonucu elde etmek için E şeklinin her bacağı ayrı ayrı üretilmeliydi. Bütün bu zorluklar nedeniyle Goss'un buluşu 1941'e kadar ticari piyasaya çıkamadı, ancak transformatörün gelişiminde önemli bir rol oynadı.

Elektriksel yalıtım ve soğutma sistemleri de transformatörün performansını etkileyen olgular arasındadır. Bu iki sistem yakından ilişkilidir. Çekirdek ve iletkenlerin ürettiği ısı yalıtkanlığın ömrünü belirlerken, yalıtımda kullanılan malzeme de, katı, sıvı ya da gaz olsun, üretilen ısının uzaklaştırılmasında önemli rol oynar. Transformatör içindeki sıcaklık genellikle 100 °C'ye ulaşmaktadır. Bu şartlar altında yalıtkan malzemenin bozulması kullanım süresini sınırlamaktadır.

Stanley transformatöründe yalıtım ve soğutmayı sağlayan tek madde havaydı, kullanılan pamuğun tek amacı telleri birbirinden ayırmaktı. Kısa bir süre sonra Geiorge Westinghouse tüm transformatörü bir yağ havuzuna batırdı ve çekirdek içindeki katların arasını açarak yağın aralarında hareket etmesini sağladı. Yağa batırılmış pamuğun yalıtma özelliğinin kuru pamuktan daha üstün olduğu anlaşıldı ve yağlı selülozik malzemeler bugüne kadar kullanılan standart bir malzeme haline geldi.

Yağlar ucuz bir yalıtkan ve soğutucu olmalarına rağmen, yanıcı olmaları nedeniyle binalara yerleştirilen transformatörlerde kullanılmamaktadır. 1932'de ortaya çıkan klorlu hidrokarbon sıvılar (PCB) yanıcı değildir ve bir süre yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak bu maddelerin uzun sürede toksik etkileri olduğunun ortaya çıkmasıyla kullanımı sınırlanmıştır. Bina içinde kullanılan bazı transformatörlerde ise yalıtım için yanıcı olmayan hava veya azot ve cam içeren yalıtkanlar bulunmaktadır. Buralarda kullanılan gazlara küçük miktarda florokarbon eklenerek dayanıklılıkları artırılmaktadır. Diğre kuru transformatörlerde ise sertleşerek kalılaşan sıvıların polimerleştirilmesiyle üretilen dökme-reçine benzeri maddeler kullanılmaktadır.

Transformatörün boyutlarındaki küçülmenin önemli nedenlerinden biri de üretilen ısının atılmasıyla ilgili konularda meydana gelen gelişmelerdir. Yağla yalıtılan transformatörlerde ilk önceleri soğutucu madde ısı taşınma ("convection") yöntemiyle dolaştırılmıştır, ancak bugünlerde yağdaki ısıyı uzaklaştırmak için daha gelişmiş yöntemle kullanılmaktadır. Birçok transformatörde yağın taşınım ya da pompalama ile dolaştırıldığı vantilatörlü dış radyatörler vardır.

Mühendisler, yıllardır buharla soğutmayı da denemektedir. Bu yöntemde, iletken olmayan, kaynama noktası düşük bir sıvı sıcak bölümlere dokununca buharlaşır, bu gaz ayrı bir bölüme alınarak yoğunlaştırılır. Buhar soğutmalı bazı transformatörler kullanılmakla birlikte bunların maliyetleri henüz alışılmış benzerleriyle rekabetten uzaktır. Ancak bu teknoloji ümit vaatmekte ve çalışmalar sürmektedir.

Transformatör ikinci hizmet yüzyılına girerken evriminin nasıl süreceğini önceden söylemek kolay değildir. Şekilsiz ("amorphous") metallere ilgili çalışmalar, bu malzemelerin çok ümit verici manyetik özellikleri olduğunu göstermiştir ancak bu tip malzemelerin üretilmesiyle ilgili yöntemler şu aşamada ekonomik değildir. Bobinlerinde elektrik direnci olmayan süperiletken transformatörler, laboratuvar gösterileri için üretilmiştir ancak bunların sıcaklıklarının mutlak sıfırın (-276°C) birkaç derece üzerinde tutulmaları gereklidir ve bu haliyle kullanışsızdır. Böyle çalışmaların teknik gelişme konusunda ümit vermesine rağmen günümüzde elektrik gücü endüstrisindeki kapasite fazlası nedeniyle iyi durumda olmayan ticari piyasaya, ağır ağır meydana gelen gelişmeleri kesinlikle devam ettirmekle birlikte, transformatör yapımında temelden değişiklik yaratacak hareketleri erteleyecektir.

Sonuç olarak şu sorulabilir; transformatör kalacak mı? Katı hal devreler radyo, ses sistemleri, televizyon setleri gibi küçük elektronik araçlarda transformatöre olan ihtiyacı azaltmıştır. Çok daha büyük boyutlardaki katı-hal (solid-state) aygıtlar, dönüşüm işleminde yine transformatöre ihtiyaç duyulmasına rağmen, bazı durumlarda yüksek gerilimli elektrik gücünü değişken akım yerine doğru akımla iletmeyi uygulanabilir hale getirmiştir. Bunlar katı-hal aygıtların güç sistemlerinde transformatörün bazı işlerini devir alabileceğini gösteren ipuçlarıdır.

Yüksek sıcaklık süperiletkenliğinde yakınlarda meydana gelen gelişmeler, oda sıcaklığında süperiletken olabilecek bazı malzemelerin bulunabileceği yolundaki ümitleri artırmıştır. Böyle malzemeler bulunur ve yüksek akım taşıyabilirlerse, elektriğin düşük gerilimde yüksek akımda doğru akımla iletimi daha uygun olabilir. Henüz hiç kimse böyle malzemelerin ne zaman yapılacağını veya yapılabileceğini bilmemektedir. Ayrıca kurulu güç sistemlerinde bu çapta bir değişikliğin ekonomik açıdan nasıl sonuçlar doğuracağı da karanlıkta kalan bir noktadır.

Bu gelişmelerin ve teknolojik ilerlemenin önceden bilinmez tarihinin ışığı altında, transformatörün sonsuza dek kalacağını söylemek pek mantıklı olmayacaktır. Fakat transformatör büyük olasılıkla, ikinci yüzyılında da birincisinde olduğu gibi sessiz, verimli ve elektrik sistemine yardımcı olarak hizmet etmeye devam edecektir. D