

Yüksek Gerilim Doğru Akım (Y.G.DA) İletimi ve Tiristorlor^{d)}

DEMİRAY ERCAN

Elekt. Y. Müh.
Ortadoğu Teknik Üniversitesi

ÖZET

Bu yüzyılın başında elektrik enerjisinin iletimi genellikle doğru akım ile yapılırdı. Transformatörlerin ve değişen akım makinalarının gelişmeleri ile değişken akım uygulama alanında doğru akımın yerini aldı. Fakat 1950 yıllarında cıva buharlı doğrultucuların geliştirilmelerinden sonra yüksek gerilimli doğru akım iletiminin yüksek gerilimli değişken akım iletimine göre bazı üstünlükleri olduğu görüldü. Bununla birlikte cıva buharlı doğrultucuların birçok mahzurlu yanları vardır ve aşağıdaki yazıda tiristor kullanılan Y.G.D.A. sistemleri incelenmektedir.

SUMMARY

At the start of this century electrical transmission was mainly direct current. With the development of efficient transformers and A.C. machines, the advantages of A.C. transmission and utilisation were very soon realised and put into practice. With the development of high voltage and high power mercury arc rectifiers in about 1950 it was realised that direct current transmission had many advantages over A.C. in particular circumstances. The success of these prototype schemes has led to a renewed interest in H.V.D.C. transmission. The mercury arc rectifiers however have several disadvantages and this paper describes H.V.D.C. systems using thyristors.

1. Y.G.D.A. İLETİM SİSTEMİ :

Bir Y.G.D.A. iletim sisteminin basitleştirilmiş, şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi (soldan sağa doğru izlenecek) değişken akım gerilimi yükseltici transformatörle yüksek gerilim değerlerine çıkarılmakta ve doğrultucularla⁽²⁾ doğru akıma dönüştürülmektedir. Yüksek gerilimli bu doğru akım, iletim hattı ile enerjinin kullanılacağı yere iletilmekte ve değiştirici⁽³⁾ merkezde doğru akım değişken akıma çevrilmektedir. Yüksek gerilimli bu değişken akım daha sonra indirici transformatörlerle alçak gerilime indirilmekte ve değişken akım dağıtım harasına bağlanmaktadır.

Burada üzerinde durulacak önemli bir nokta var: Şekil -1 de BB' noktaları arasında sıfır frekanalrı bir gerilim yani doğru akım gerilimi vardır. Bu doğru gerilimin hangi frekansta değişken gerilime çevrileceğinin değiştirici merkeze «bildirilmesi» gereklidir. Bu işi, şekilde değiştirici taraf harasına bağlı gösterilen senkron

jeneratör yapar. Yani, senkron jeneratörün frekansı ayarlanarak doğru akımı istenilen frekans-taki değişken akıma çevrilebilir. Dolayısıyla 1 ve 2 no. lu haraların birbirine bağlanması için frekanslarının eşit olması gerekli değildir. Bir başka deyişle, Y.G.D.A. iletim hattı kullanarak frekansları değişik güç sistemlerini birbirine bağlamak olanaklıdır.

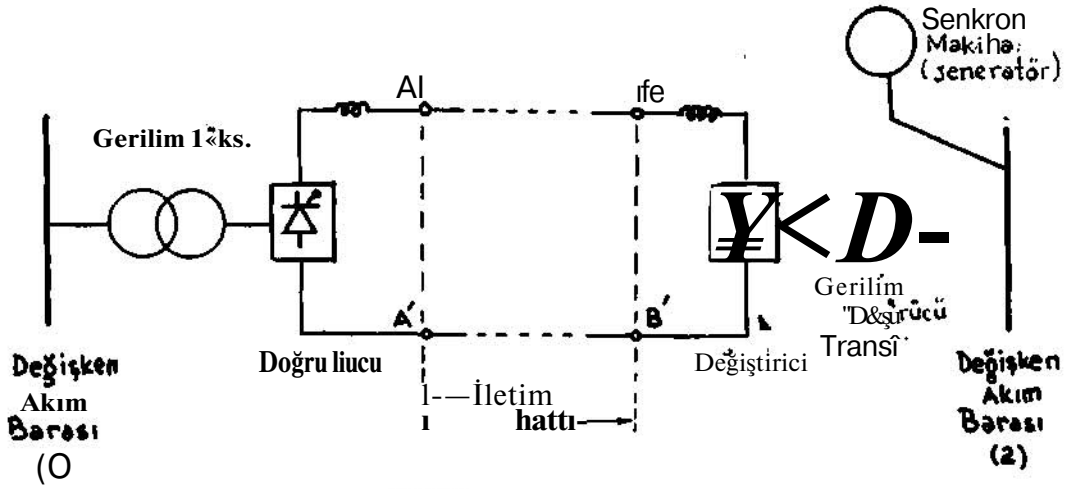
Y.G.D.A. iletim sisteminin çalışmasının daha iyi anlaşılabilmesi için doğrultucu ve değiştirici merkezlerin çalışmasının biraz ayrıntılı olarak incelenmesi gereklidir.

2. DOĞRULTUCU VE DEĞİŞTİRİCİLERİN ÇALIŞMASI :

Tiristor çalışma yönünden cıva buharlı doğrultuculara çok benzer. Tiristorun üç ucu vardır: Anod, katod ve kapı (ava buharlı doğrultucularda anod, katod ve ısıkara). Katoda göre pozitif olan bir gerilim anoda uygulandığı halde kapıya küçük değerde bir pozitif gerilim veya darbe uygulanmadıkça tiristor iletmez; bu durumda açık devreli bir anahtar gibidir. Kapıya darbe gerilimi uygulandığında ise tiristor iletken olur; bu durumda kapalı devreli bir anahtar gibidir. Ancak tiristor bir kez iletici duruma geçtiği zaman cihazın çalışması üzerinde kapının hiçbir komuta etkisi kalmaz. Tiristorun durdurulması yani iletmeyen duruma getirilmesi

(1) Bu yazının başlangıcı olan başka bir yazıda [Elektrik: Mühendisliği, sayı 161, Mayıs 1970] doğru akım ve değişken akım iletiminin genel bir karşılaştırılması yapılmış ve Y.G.D.A. iletiminde cıva buharlı doğrultucuların ortaya koyduğu sorunlar incelenmiştir.

(2) Doğrultucu: Değişken akımı doğru akıma çeviren, Değiştirici: Doğru akımı değişken akıma çeviren.



ÇeçH i. Bir Y.G.D.A. iletim sisteminin basit şeması.

İçin anod-katod akımının küçük bir değere düşmesi (yani anod-katod geriliminin sıfıra gitmesi) gereklidir. Değişken akım uygulamalarında gerilimin sıfıra düşmesi saniyede 100 kez olur (50 Hz. İlk sistemler için). Dolayısıyla tiristorun her pozitif yarı dalga için yeniden iletir duruma getirilmesi gerekir. Tiristorun iletir duruma getirilmesine «tiristorun ateşlenmesi» denir.

Tiristor kullanarak değeri değişebilen bir doğru akım gerilimi elde edilebilir. Şekil 2(a) da gösterildiği gibi, bir tek fazlı tam dalga diod köprüsü alalım ve diodların yerlerine tiristorları yerleştirelim. T1 ve T4 ün kapılarına aynı anda uygulanmak durumunda olan ateşleme darbeleri 0 noktasında değil de A noktasında uygulanmış olsun (Şekil 2(b)). A noktasına gelinceye kadar T1 ve T4 ten hiç akım geçmeyecek ancak bu andan sonra geçecektir. Kolaylık olsun diye dikkörtgen şeklinde gösterilen bu akım. (Şekil 2(c)) B noktasında sıfır olmaz çünkü çıkış devresinde bulunan büyük değerli bir endüktans, gerilim sıfıra düştükten sonrada akımın devamlılığını sağlar. Bu endüktans devrede olmasaydı T1 ve T4, B noktasından sonra iletmiyeceklerdi C noktasında, ateşleme darbeleri bu kez T2 ve T3 çiftine uygulanır ve bunlar ateşlenir. Böylece akım, T1-T4 çiftinden T2-T3 çiftine aktarılır. Bu işleme «komütasyon» denir.

Yukarıdaki incelemede ateşleme darbelerinin α açısı kadar geciktirerek uygulamıştık. Bu açı, derece cinsinden söylenir ve «gecikme açısı» veya «ateşleme açısı» diye adlandırılır (angle of delay, firing angle).

Şekil 2(b) den görülebileceği gibi, doğrultulan bu gerilimin bir ortalama değeri vardır. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanabilir :

$$V_d = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \theta d\theta - \int_0^{\alpha} V_m \sin \theta d\theta \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \alpha} V_m \sin \theta d\theta = \frac{2}{\pi} V_m \cos \alpha \quad \dots (3)$$

(3) eşitliği önemli bir bağıntıdır. $\left(\frac{2}{\pi} V_m \right)$

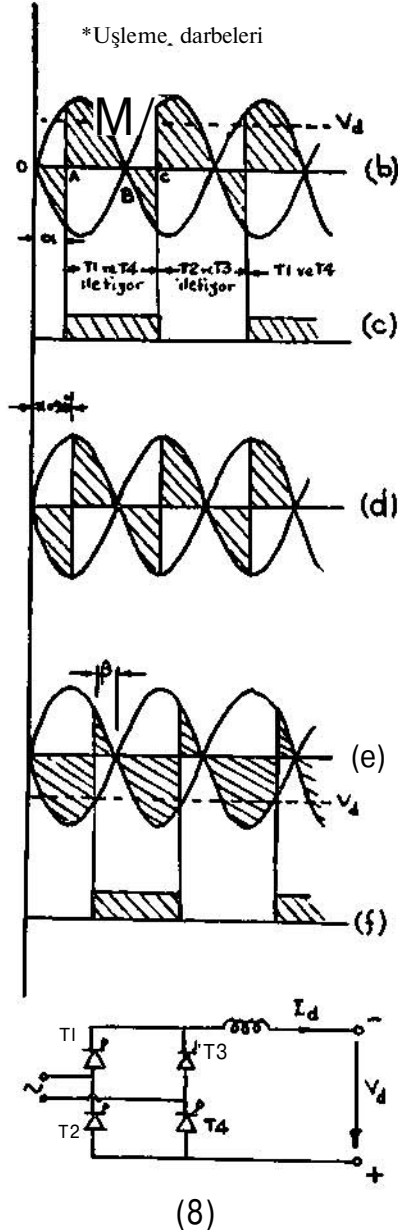
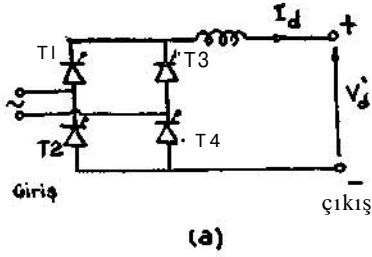
terimi, gecikme açısı « sıfır olduğu zaman elde edilen ortalama çıkış gerilimi olup bunu V^{\wedge} ile gösterirsek Şekil 2 (a) da gösterilen doğrultucunun çıkış gerilimi ;

$$V_d = V_{do} \cos \alpha \quad \dots (4)$$

denklemleri ile verilir.

Şekil 2(c) ye bakarsak, T1 -T4'ten geçen akımın T1 - T4 ün uçlarındaki gerilimden α açısı kadar geride olduğu görülür. Yani doğrultucunun güç faktörü $\cos \alpha$ ya eşittir. Bu nokta, Y.G.D.A. sisteminde körgüç (reaktif güç) yönünden önemlidir.

Gecikme açısını 90° ye kadar büyütelim. Şekil 2 (d) de gösterildiği gibi çıkış geriliminin pozitif ve negatif kısımları eşit olurlar ve net gerilim sıfırdır. Bu sonuç (4) no. lu eşitlikte de görülebilir. Şimdi gecikme açısını 90° den daha fazla büyütelim. Şekil 2(e) den de görülebileceği gibi ortalama çıkış gerilimi negatif olur. Bu durumda, doğrultucunun çıkış ucu yük değil kaynak olmaktadır (Şekil 2(g)). Doğrultma işleminin tersi olan bu işleme «inversiyon» denir. Yani doğrultmada güç, değişken



Şekil 2. Tlntstorlu bir tele faz tam dalga doğrultucusunda türlü dalga biçimleri (ref. 2, sayfa 92).

akım yönünden doğru akım yönüne doğru, değiştirmede ise doğru akım yönünden değişken

akım yönüne doğru akmaktadır. Ancak, unutmamak gerekir ki değiştirme işleminin oluşabilmesi için çıkışta V_d gerilimli bir canlı doğru akım kaynağının (başka bir doğrultucu veya doğru akım jeneratörü gibi) bulunması gereklidir.

Değiştirmedeki p açısına (bak. Şekil 2 (e) »önleme açısı« (angle of advance) denir. Bu açı 180-«ya eğittir. Bir değiştiricinin güç faktörü \cos/sya eşit olup akım gerilimlin ilerisindedir.

Bu kısımdaki önemli noktaları şöylece özetleyebiliriz:

a. En büyük gerilim değerleri $\alpha = 0$ ve $p = 0$ durumları için elde edilir.

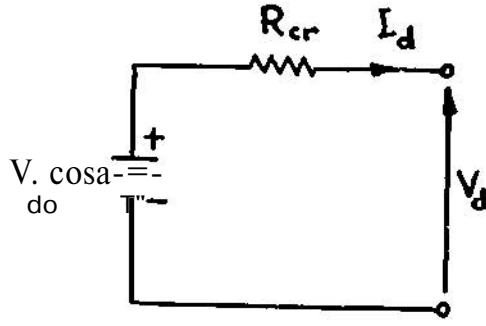
b. Güç faktörü ancak $\alpha = 0$ ve $p = 0$ için bir'e eşittir. Bunların dışındaki değerler için güç faktörü bir'den küçüktür. Yani α ve 0 'nın değerleri büyüdükçe doğrultucu ve değiştirici merkezlerin kör güç isteği artmaktadır. Bu yüzden, Y.G.D.A. sistemlerinde olabildiğince küçük α ve p değerleri ile çalışmak arzu edilir. Ancak, uygulamada bu değerler çeşitli nedenler yüzünden sıfır yapılamazlar ve 10° ile 30° arasında değişirler.

3. DOĞRULTUCU VE DEĞİŞTİRİCİ EŐ-DEĞER DEVRELERİ:

Y.G.D.A. iletim sisteminin çalışmasını kavramada eşeğer devrelerle çalışmak yararlı olmaktadır. Doğrultucu ve değiştiricinin eşeğer devreleri Şekil 3 te gösterilmiştir. Eşeğer devrelerin, çıkarılması burada verilmeyecektir; konu ile ilgili kitaplarda bulunabilir (Ref. 1, Böl. 4).

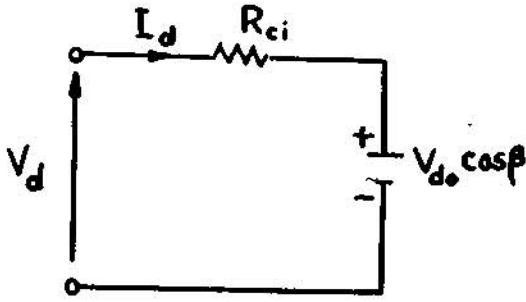
(4) no. lu denklemde de gösterildiği gibi doğrultucunun çıkış gerilimi $V_d \cos \alpha$ ile verilir. Bu gerilim eşeğer devrede gerilim kaynağı olarak gösterilmiştir (Seki 3(a)). Devrede gösterilen R_d direnci omik direnç olmayıp reaktif dirençtir ve «komütasyon reaktansı» diye adlandırılır. R_d dan dolayı devrede ısı kaybı olmaz ancak I_d^2 / a eşit bir gerilim düşmesi olur. Değiştiricinin eşeğer devresi de şekil 3(b) de gösterilmiştir.

önleme açısı p iki kısımdan meydana gelir : $p = \alpha + \beta$. Burada α , komütasyon açısıdır ve akımın bir tiristor grubundan diğerine atlama-sı için geçen zamanın açı cinsinden karşılığıdır. β ise sönme açısı (extinction angle) diye adlandırılır ve değeri en az tiristorun deiyonize olma süresine eşittir. Y.G.D.A. sistemlerinde kontrol p açısı gözetilerek yapıldığında (değişmez p kontrolü) komütasyon aksamaları olmakta ve sistem kısa süre içinde olsa çalışmayı



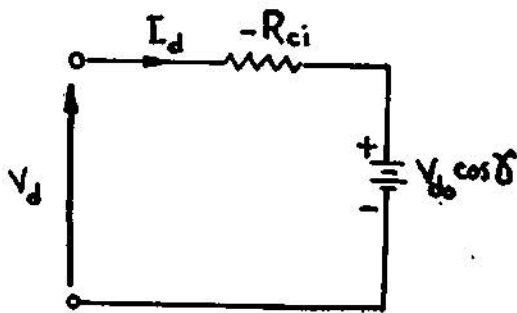
$$V_d = V_{d0} \cos \alpha - I_d R_{cr}$$

a. Doğrultucu



$$V_d = V_{d0} \cos \beta + I_d R_{ci}$$

b. Değişirici



$$V_d = V_{d0} \cos \delta - I_d R_{ci}$$

c. Değiştirici

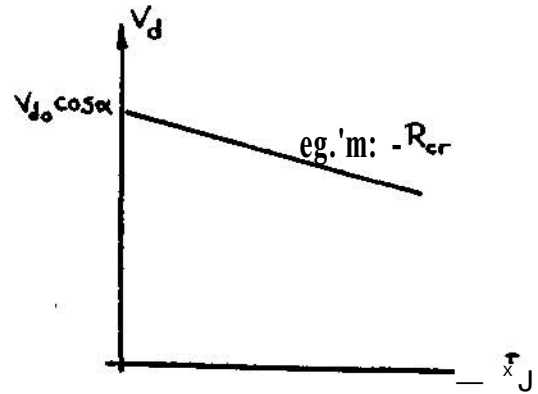
Şekil 3. Eşdeğer devreler.

durdurmaktadır. Bundan kaçınmak amacıyla sistemin kontrolü γ açısı gözetilerek yapılır (değişmez γ kontrolü). Bu tür kontrol Y.G.D.A. sistemlerinin çoğunluğunda kullanılır. Değişmez γ kontrolü kullanılan bir deşğıtiricinin eşdeğer devresi Şekil 3(c) de verilmiştir. Bizde bu eşdeğer devreyi kullanacağız.

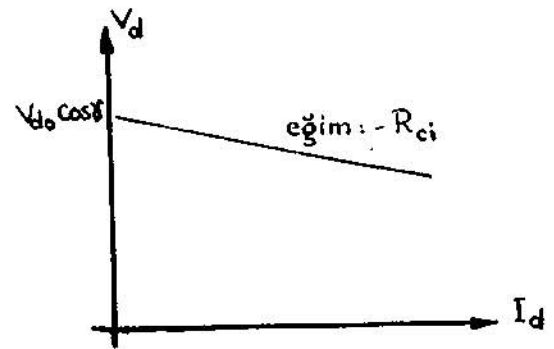
ŞekU 3(a) ve 3(c) de gösterilen eşdeğer devrelerin V-I grafikleri, şekillerin altında verilen denklemler yardımıyla kolayca çizilebilir. Bu grafikler ŞekU 4'te gösterilmiştir.

Şimdi, ŞekU 3(a) daki eşdeğer devre ile 3(c) deki eşdeğer devreyi bir R direnci ile birleştirirsek ŞekU 1 de gösterilen Y.G.D.A. sisteminin eşdeğer devresi elde edilir. R direnci iletim hattının omik direncidir. Bu eşdeğer devre Şekil 5 te verilmiştir.

ŞekU 4 (a) ve 4 (b) de verilen grafikleri bir arada çizersek ŞekU 5 te gösterilen eşdeğer devrenin grafiğini elde etmiş oluruz. Bu grafik Şekil 6 da gösterilmiştir.

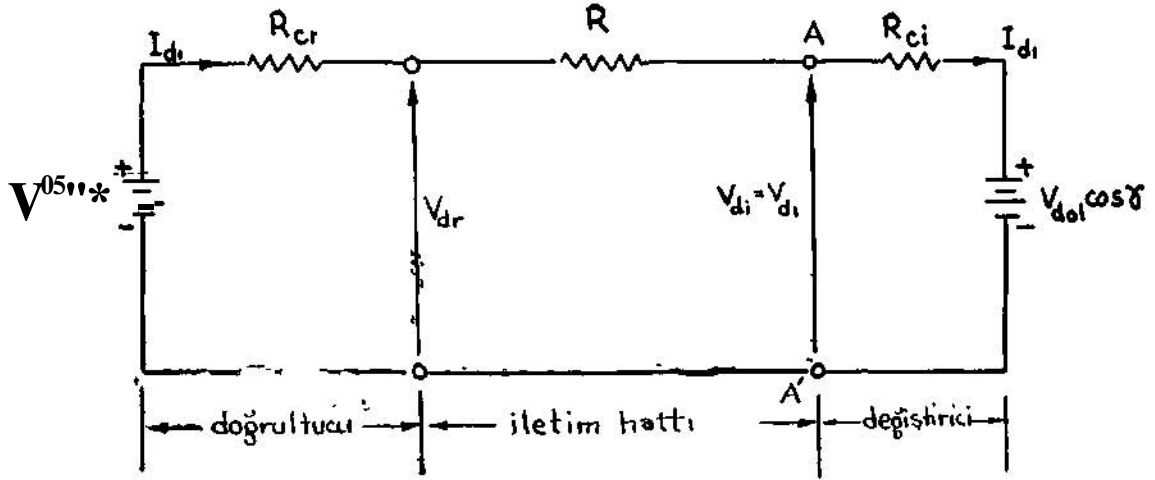


3. Doğrultucu

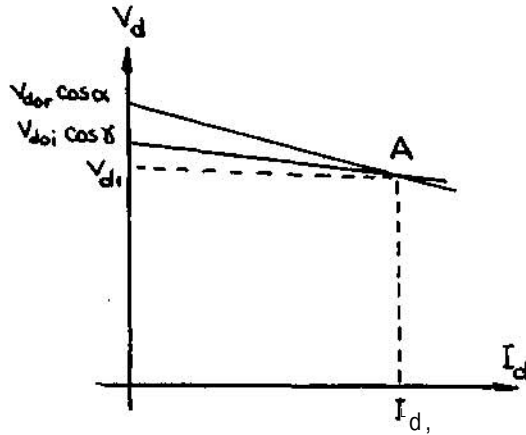


b. Değiştirici

Şekil 4. Doğrultucu ve deşğıtiricinin V-I grafikleri.



Şekil 5. BIT Y.G.D.A. sisteminin eşdeğer devresi.



Şekil 6. Bir Y.G.D.A. sisteminin çalışma grafiği.

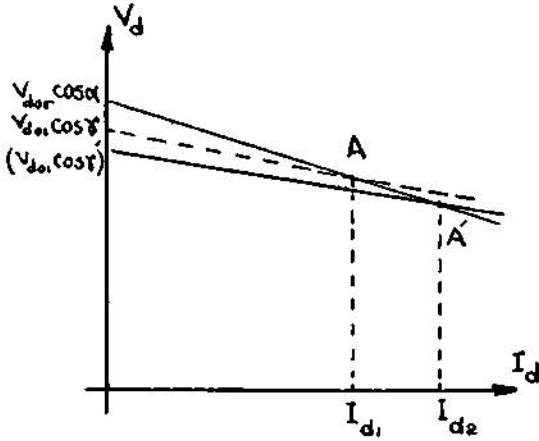
4. Y.G.D.A. SİSTEMİNİN ÇALIŞMASI :

Şekil 6 da gösterilen doğrultucu ve değiştiricilerin grafiklerinin kesim noktası çalışma gerilim ve akımını verir. Bu gerilim ve akım değerlerinin türlü çalışma koşulları altında nasıl değişeceklerini incelemeye önce Y.G.D.A. sisteminin koruma ile ilgili özelliklerine değinmek yararlı olur. Bilindiği gibi, bir güç sisteminde kısa devre koşulları altında devreden çok büyük akım geçer. Bu büyük akım değerleri pek çok yönden zararlıdır ve olabildiğince en kısa süre içinde önlenmesi gereklidir. Bu ise, devreyi açarak akımı durdurmak ile yapılabilir. Değişken akımda devreyi kesmek için en uygun an akımın sıfıra indiği andır. Doğru akımda ise akımın sıfır olduğu an yoktur, bu yüzden devrenin büyük akım değerleri altında kesilmesi gereklidir. Bu ise, doğru akımda devre kesme işleminin değişken akımdakine oranla daha güçlü olması sonu-

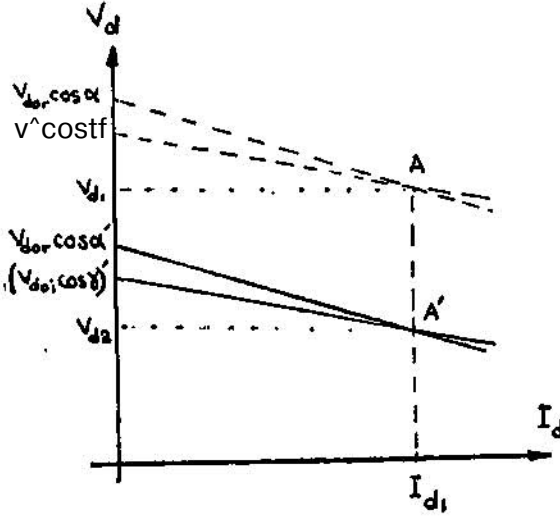
cunu doğurur. Bugün, henüz doğru akım güç sistemleri ile kullanılacak kadar etkili ve hızlı devre kesiciler yoktur. Bu nedenle, Y.G.D.A. sistemlerinin doğru akım tarafında genellikle devre kesici bulunmaz. Sistemin korunmasında ise tiristorların (veya cıva buharlı doğrultucuların) kapı (veya iskara)ları ile kontrol edilebilme özelliklerinden yararlanır. Bunun nasıl yapıldığını aşağıda görelim :

Şekil 6 ya bakarak, varsayalım ki değiştirici merkezin geriliminde bir düşme olsun. Bu düşme, ya değiştirici taraf değişken akım geriliminin ($V_{doi} \cos \delta$) düşmesi ile olur ya da sönme açısının artması ile olur. $V_{doi} \cos \delta$ teriminin azalması demek değiştirici grafiğinin kendisine paralel olarak güneye kayması demektir. Bu durumda, çalışma noktası A güneydoğuya kayar; yani sistemde akan akım artar (bak. Şek. 7). Devreden akan güç değişmemiş ancak değiştirici merkezin giriş gerilimi (Şekil 5 te V_{d1}) azalmış ve devredeki akım artmıştır. Bu akım artışı doğrultucu ve değiştirici merkezlerde bulunan tiristorlar (veya cıva buharlı doğrultucular) için tehlikelidir. Kısa zamanda önlenmezse aşırı sıcaklık artışı nedeniyle sonunda tiristorlar (veya cıva buharlı doğrultucular) yanarlar.

Bu akım artışını önlemek için, akım artmağa yöneldiğinde doğrultucu kontrol devresi çalışmalı ve gecikme açısı α 'yı arttırarak ($V_{dor} \cos \alpha$) değerini düşürmeli ve böylece devreden geçen akımı yine normal değerine indirmelidir. Durum Şekil 8 de gösterilmiştir. Aynı şekilde, doğrultucu tarafın geriliminde ($V_{dor} \cos \alpha$) bir yükselme olursa akım yine artmaya yönelecektir. Bu durumda da doğrultucu kontrol devresi çalışarak α açısını arttıracak, böylece akımı normal değerine düşürecek.



Şekil 7. Değiştirici merkez gerilimi düşüyor.



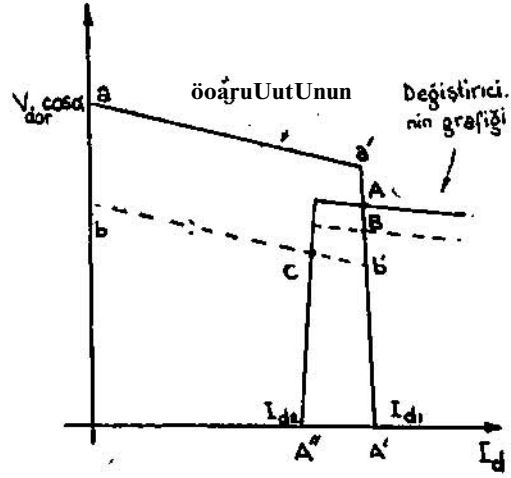
Şekil 8. Değişmez akım çalışması.

Şimdi, iletim hattı üzerinde herhangi iki nokta arasında (örneğin Şek. 5 te AA' noktaları arasında) kısa devre olduğunu düşünelim. Devredeki akım bu durumda sadece $R_{cr} + R$ direnci tarafından sınırlandırıldığından çok büyük değerlere ulaşır çünkü $R_{cr} + R$ in değeri oldukça küçüktür. Bu akımın değeri gerilime ve dirençlere bağlı olarak, devreden geçmesi gerekli normal akım değerinin 10,25,50,... katı değerinde olabilir. İşte bu durumda, doğrultucu kontrol devresi çalışarak gecikme açısı α yi 90° ye yükseltir ve böylece $V_{dor} \cos \alpha = 0$ olur ve devredeki akım kesilir. Ancak, uygulamada bu açı 90° den birkaç derece eksik tutulur ve dolayısıyla devreden geçen akım sıfır olmaz; küçük bir değerde kalır.

Bu kısa devre akımı uygulamada normal devre akımının 1.5 katı dolaylarında tutulur.

Şimdi de doğrultucu tarafın geriliminde ($V_{dor} \cos \alpha$) bir düşme veya değiştirici tarafın geriliminde ($V^{\wedge} \cos \gamma$) bir yükselme olduğunu düşünelim. Her iki halde de devreden geçen akım azalmaya yönelecektir. Bu ise istenmeyen bir durumdur çünkü akımın düşmesi ile iletilen güç düşecektir, işte bu durumda değiştirici kontrol devresi çalışarak sönme açısı γ nm değerini artırır. ($V^{\wedge} \cos \gamma$) küçülür ve akım değeri yine artar. İletim hattının kısa devre olması halinde ise V_a gerilimi (Şek. 5) sıfır olacağından değiştirici merkez çalışmaz. Hatırlanacağı üzere, değiştirme işleminin oluşabilmesi için AA' arasında canlı bir doğru akım kaynağının bulunması gereklidir. Böylece kısa devrelerde değiştirici merkez de korunmuş olur.

Bir Y.G.D.A. sisteminin çalışma grafiği daha çok Şekil 9 da gösterildiği gibi çizilir. Grafiklerin yataya yakın kısımları üzerinde α veya γ açıları değişmez. Grafiklerin düşeye yakın kısımları üzerinde ise aşağıya kayıldıkça α ve γ açılan artar; A' ve A'' noktalarında en büyük değerlerini ($=90^\circ$) alırlar. Yani, normal koşul-



Şekil 9 Bir Y.G.D.A. sisteminin çalışma grafiği

lar altındaki çalışma noktası olan A noktasında doğrultucu merkez değişmez akım modunda ve değiştirici merkez ise değişmez γ modunda çalışır. Herhangibir nedenle değiştirici merkez gerilimi düşerse çalışma noktası B'ye kayar yani değiştirici merkez yine değişmez γ modunda, doğrultucu merkez ise α açısı büyümüş olarak değişmez akım modunda çalışır. Doğrultucu merkezin gerilimi düşerse (yani aa'A' grafiği yerini bb'A' ne bırakırsa) çalışma noktası C'ye kayar ve bu durumda doğrultucu merkez deyiş-

mez a modunda ve değiştirici merkez de büyümüş y açısı ile değişmez akım, modunda çalışır. A' ve A" noktaları kısa devre noktalarıdır.

Görülüyor ki çalışma koşulları, ne olursa olsun devredeki akım değeri I_{d1} ve I_{d2} arasında kalmaktadır. Kuramsal olarak bu değerler birbirine eğit olmalıdırlar fakat uygulamada I_{d1} ve I_{d2} değerleri eğit değildirler. Böyle bir fark, sistemin kararlılığı yönünden önemlidir ve gereklidir.

I_{d1} ve I_{d2} arasındaki farkı ihmal ederse bir Y.G.D.A. sisteminin çalışması değişmez akım karakterindedir. Akımın, kısa devre durumunda bile değişmez kalması sistemde kullanılan tiristorların korunması yönünden çok önemlidir. Tiristorlar, küçük «ısısal atalet» leri yüzünden büyük akım değerlerinden fazla etkilenirler, ve uygun biçimde korunmazlarsa birkaç milisaniye içinde bile yanabilirler. Bu yüzden, değişmez akım çalışması tiristorlar için ideal bir alışma Őekliidir.

Bir Y.G.D.A. sisteminin çalışmasını özetlemek istersek konunun başlarında verilen Őemayı yeniden Şekil 10 daki gibi çizmek yerinde olacaktır. Sistemdeki koruma, ve kontrol işlemleri birleştirilmiş ve tiristorların kapı kontrolü zelliklerinden yararlanılmıştır. Doğru akım tarafında genellikle devre kesiciler yoktur. Değişken akım tarafına devre kesiciler yerleştirilmiştir. Sistemin önemli kısmı, değişmez akım kontrol devreleridir. Bu devreler, sistemdeki akım ve gerilimi sürekli ölçerek gerekli a ve y açılarını ÇOK kısa zamanda hesaplar ve a ve y açıları kadar geciktirilmif veya ne alınmış darbe gerilimle-

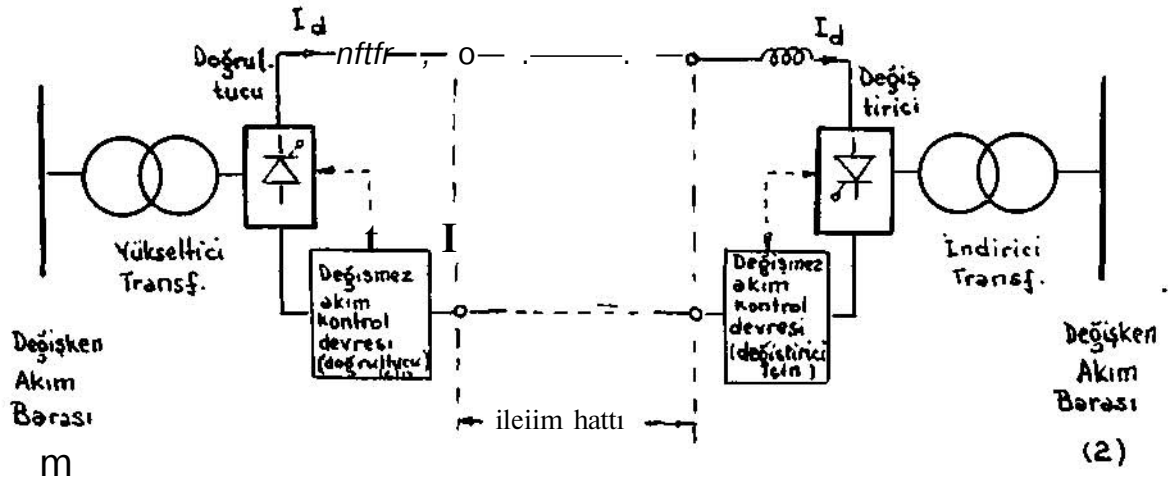
rini doğrultucu ve değiştirici merkezlerdeki tiristorların kapılarına uygular. Bu işi yapabilecek en uygun cihazlar elektronik hesap makinalarıdır ve Y.G.D.A. sistemlerinin hemen hepsinde bu makinalar kullanılmaktadır.

5. SONUÇ VE Y.G.D.A. SİSTEMLERİNİN GELECEğİ:

1963 yılında Dünya'da çalışmakta olan 4 adet Y.G.D.A. sistemi vardı. Kurulmakta olan sistemlerin sayısı ise yine 4 t. Yine 1963 yılında yapımı tasarlanan Y.G.D.A. sistemlerinin sayısı 10'u bulmuştu. Bugün ise bu sayılar çok ha büyük değerlerdedir ve Y.G.D.A. sistemleri giderek daha çok ilgi toplamaktadır. Birinci bölümde belirtildiği gibi, tiristorların cıva buharlı doğrultuculara olan stnlkleri Y.G.D.A. sistemlerinin gelecekte belki de tamamen tiristorlarla donatılacağını düşündürmektedir. Elektronik hesap makinaları ise Y.G.D.A. sistemlerinin ayrılmaz parçaları olmaktadır.

REFERANSLAR

1. High Voltages Direct Current Convertors and Systems, Edit. J. Cory, Macdonald, Londra, 1965.
2. Semiconductor Devices in Power Engineering, Edlt. J. Seymour, Pitman Londra, 1968.
8. Solide Stote H. V. D. O. Transstission Technology, F. D. Kaiser, IEEE Spectrum C3, N11, Kasım 1966, S 48-51.



Şekil 10. Bir Y.G.D.A. iletim sistemi Şeması (kontrol devreleri ile birlikte).