

# LOKOMOTİF D.A. MOTORU İÇİN REJENERATİF FRENLEME SİSTEMİ\*

Yazan: J. M.W. WHITING - General Electric Com.  
Çeviren: Bülent OTUZ, Elektrik Müh.

## ÖZET

Bu makalede, kıyıcı -denetimli da. seri motoru kullanan bir rejeneratif frenleme sistemi tanıtılmıştır. Bu sistemin bir özelliği, hız düşüğe zayıf-alan modundan, tam-alan moduna otomatik geçiştir. Hat gerilimindeki ani değişimler, daha ucuz şekilde, ayrı-uyarımlı bir motor dizgesi ile temin edilebilir. İkinci bir kıyıcı devresi ile frenleme reostasının etkili direnci denetlenebilir ve böylece, kaynağın sınırlamaları çerçevesinde rejeneratif ve reostatik frenlemeler birleştirilebilir ve önemli enerji tasarrufları sağlanabilir.

## SUMMARY

A regenerative braking system using a chopper-controlled d.c. series motor is described. A feature of the system is the automatic change from a weak-field to a full -field mode of operation as the speed falls. Sudden changes in line voltage can be resistance of a braking rheostat so that regenerative and rheostatic braking can be blended and the greatest possible energy savings can be made, within the limits imposed by the receptivity of the traction supply system.

Günümüzde demiryolu taşımacılığı uygulamaları için asenkron motor geliştirme çalışmalarına oldukça büyük ilgi gösterilmekle birlikte, halihazırda dünyanın elektrikli taşıma gücünün tamamını DA motoru oluşturmaktadır. Elektrikli taşımanın ilk günlerinden bu yana, DA motoru için uygun rejeneratif frenleme yöntemleri bulma yönünde büyük çabalar sarfedilmiştir. Buna karşılık, yaklaşık 15 yıl önce demiryolu taşımacılığına yarı iletken teknolojisi uygulanana kadar rejeneratif frenleme, reostatik frenlemeyle kıyaslandığında çok nadir ve hemen hemen bütünüyle başarısız kalmıştır.

\* Bu yazı, GEÇ Journal of Science and Tech. dergisinin Vol. 48, No. 3,1982 sayısından çevrilmiştir.

Genelde kolay çözümlenemeyen iki problem bulunmaktaydı:

i) üretilen akımdaki dalgalanmaları önlemek için kaynak gerilimindeki ani değişimler, motor denetlecinde süratli tepki gerektiriyordu ve ü) İletken demiryolunda sıkça bulunan boşluklar, frenleme gayretini sürdürmek ve aşırı gerilim üretimini önlemek için üretilen akımı çok çabuk ve geçici olarak bir reostaya aktarmayı gerektiriyordu.

Her ne kadar bu problemlerden ilki, motor denetlecinde (tristör 'kıyıcısı' ve onun denetim elektroniği), katı-hâl güç anahtarlama kullanımı ile kolaylaşmışsa da, köklü bir çözüm tam-alan motor karakteristiğinin üzerindeki hızlarda, yani motorun 'baz' hızının üstündeki hızlarda dengeli bir rejenerasyonu emin kılacak yöntemle bağlantılı bulunuyordu. Tren'de baz hız, pratikte ikiye-bir oranında değişebilen ve böylece çalışma noktasını bu hızdan kaydırabilen ani gerilim değişimlerine karşı koyabilecek araçlar gerektiren, kaynak gerilimine bağlı olarak değişir. Tam-alan motor karakteristiğinin üzerinde hızlarda kararlı çalışma için, ya alan zayıflatılmal ı ya da devreye direnç sokulmalıdır. Enerji bilincindeki demiryolu yöneticileri, alan zayıflatma yöntemini tercih etmişler fakat bu, şu ana kadar kontaktörlerle kademeli olarak veya ayrı-uyarımlı motor kullanarak gerçekleştirilmiştir.

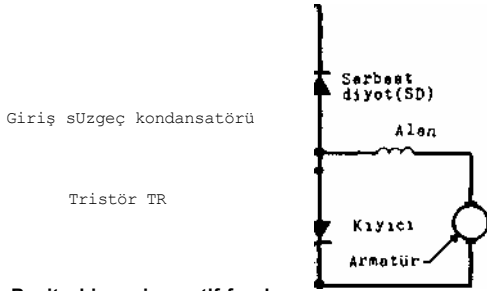
Burada anlatılan frenleme sistemi, seri bir motor kullanır ve motorun ayrı uyarıldığı baz hızının üstünde zayıf alan çalışma modundan, baz hızın altında, tam-alan seri çalışma konumuna otomatik geçiş özelliğini tanımlar. Bu özellik, çok küçük frenleme etkisi ile, hat gerilimindeki ani değişimlere sistemin üyarlabilmesini olanaklı kılar ve ayrı-uyarımlı dizgelerde genellikle kullanılan büyük, motor-düzeltilme endüktörüne gerek duymaz. Bu sistem ilk olarak Danimarka Demiryolu İşletmesinde kullanılmıştır.

## BASİT FRENLEME DİZGESİ

Bu frenleme sistemini incelemeyen önce, şekil 1'de gösterilen, seri bir da. motoru ile bir tristör denetleci (veya kıyıcısı) kullanan en basit rejeneratif-frenleme dizgesini ele alalım. Bu sistem yalnızca motorun baz hızının, yani (belli bir motor akımında) motorun ürettiği gerilimin, kaynak hat gerilimine eşit olduğu hızın altındaki hızlarda çalışır. Baz hızın altında, motorun ürettiği ortalama gerilim, kaynak geriliminden küçüktür ve kıyıcı, küçük-gerilim, yüksek-akımlı motor enerjisini, kaynağa geri gönderebilecek şekilde, görevli olarak daha yüksek-gerilim ve küçük-akım biçimine çevirerek bir trafo gibi davranır.

• Kaynak

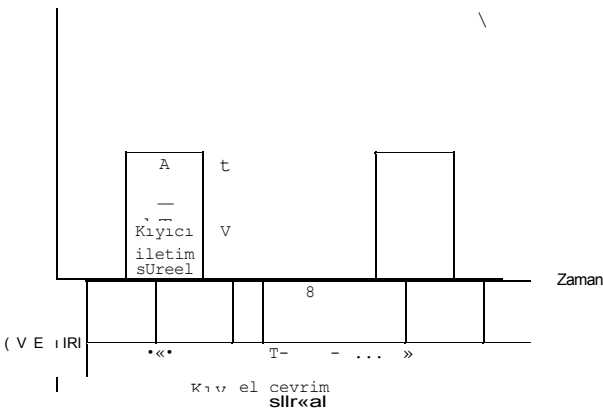
Giriş süzgeç endÜktörÜ



Şekil 1 Basit bir rejeneratif-frenleme dizgesi: bileşik reos-tatık frenleme devresi kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

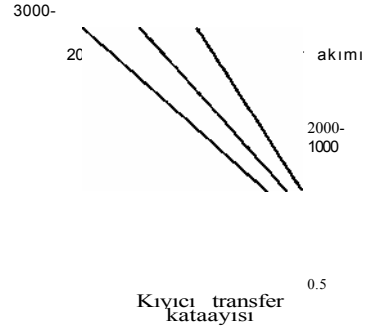
Kıyıcının çıkış geriliminin, kaynak gerilimine oranı veya onun 'çalışma' süresinin, çevrim süresi T'y e oranı, transfer katsayısı b'dir. Herhangi bir frenleme akımı için, hız azaldıkça b katsayısı artar ve böylece üretilen akım, motor, kıyıcı tarafından kısa-devre yapıldığında, baz hızında tam motor akımından, çok küçük bir hızda sıfıra kadar doğrusal olarak azalır.

Bu enerji aktarımına 'depola ve bırak' tekniği denir: kıyıcı açıkken, armatür ve alanda akım artar ve enerji, bu bileşenlerin endÜktanslarında depolanır. Kıyıcı kapandığı zaman,devrenin endÜktif doğası nedeniyle akmaya devam eden akım, serbest diyota (SD) aktarılır, diğer bir deyişle üretilen gerilim E'ye bir gerilim eklenerek (bu gerilim, endÜktans ile akımın azalma oranının çarpımına eşittir) motorun terminal gerilimi, kaynak gerilimi V'ye ulaşması için zorlanır. Böylece akım SD ve motordan geçerek havai hatta veya iletken raya akar ve depolanan enerjiyi kaynağa gönderir, işte bu da 'bırakma' sürecidir.



Şekil 2 Motor endÜktansındaki gerilim dalga şekil

Motor endÜktansında gerekli gerilim (U) sağlamak için bu teknikte belirli bir motor-akım dalgacığı esastır. Bu gerilimin dalga şekli Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 3 Azalan kıyıcı transfer katsayısı ile artan motor akımı

### Denetim Karakteristiği

Baz hızının altında bir n hızı için üretilen I akımdaki bir artış (yani frenleme gayretindeki bir artış) şekil 3'te görüldüğü gibi kıyıcı transfer katsayısı b'de bir azalmaya neden olur.

Kıyıcının çevrim süresi iyi, motor-akım dalgacığını küçük tutacak kadar kısa varsayarak, bu etkinin basit bir açıklaması olanaklıdır. Durgun durumda:

$$Udt = 0. \quad (D)$$

yani şekil 2'de alttaki ve üstteki alanlar eşit olmalıdır, şöyleki eğer motor direnci R ise,

$$bT(E-IR) = (1-b)T(V-E + IR), \quad E = (1-b)T(V-E + IR) \quad (2)$$

Kıyıcı transfer katsayısı parametre alınarak 3.) bağıntı şekil 4'te kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Şimdi üretilen gerilim, hız ve motor akımının bir fonksiyonudur. Gerilim grafiği, hız (n) parametre alınarak şekil 4'te gösterilmiştir ve yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$E = knl \dots \dots \dots (4)$$

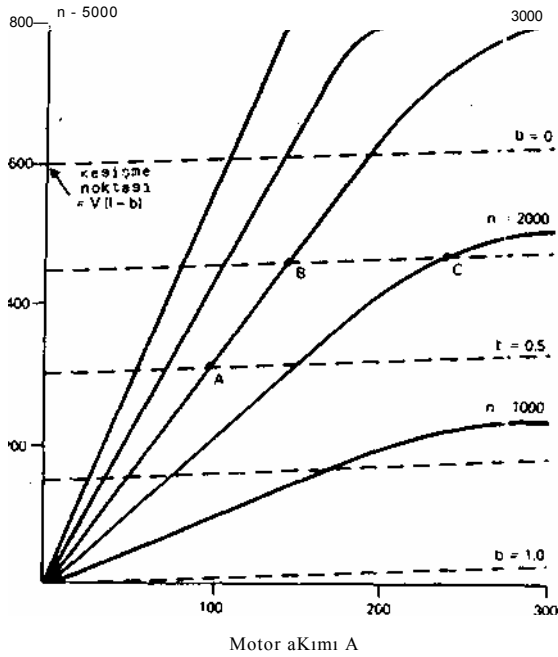
burada k, motora özgü bir sabittir. Böylece

$$(kn-R) \quad (5)$$

Bu bağıntıdan, motor akımı arttıkça, kıyıcı transfer katsayısı azalacağı gözlenir.

Şekil 4te kesikli ve düz çizgilerin kesiştiği noktalarla, olası çalışma koşulları da gösterilmiştir. 3000 dev/dakika hızında bir motor ve 0.5 kıyıcı transfer katsayısında çalışma noktası 'A'dır. Motor akımı yaklaşık 100 amper'dir. Akım 150 ampere çıkarıldığında, çalışma noktası B'ye çıkar ve transfer katsayısı 0.25'e düşer.

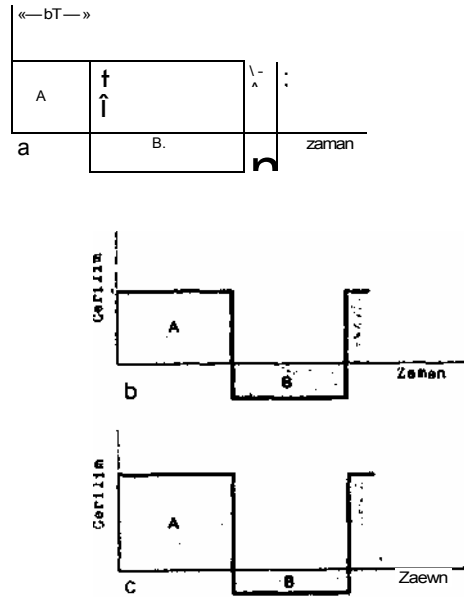
Denetleç sistemi devreye sokulmazsa çalışma kararsızdır çünkü, hızdaki düşüş, frenleme gayretini artırır ve hızı süratle daha da aşağılara düşürür. Denetim sistemi B noktasında devreye girerse, yani transfer katsayısı 0.25'te sabit tutulursa, hız 1000 dev./dak.'ya düştüğünde akım 100 amperden daha yüksek bir değere ulaşmış olur ve çalışma noktası b: 0.25 çizgisi boyunca hızla B'den C'ye geçer.



Şekil 4 Frenleme sisteminin olası çalışma noktaları. Kesikli çizgiler, kıyıcı transfer katsayısı b'nin bir değeri için, şekil 1'deki A ve B alanlarının eşit olduğu durumu gösterir. Bu çizgilerin eğimi, motor direnci R'dir. Düz çizgiler, farklı motor hızlarında motor karakteristiklerini temsil eder.

### Denetim Sistemi Tepkisi

Denetim sistemi, bir motor denetleci için genelde olduğu gibi, artan akıma tepki olarak kıyıcı iletim oranını artırır. Akımdaki ani bir artışa sistemin gösterdiği tepkiyi açıklamak üzere, hızı sabit ve manyetik doyumu ihmal edilebilir varsayarak, motor endüktansı üzerindeki gerilim şekil 5te yeniden çizilmiştir. Böylece, kıyıcı iletim süresi bT boyunca gerilim, motor akımı I ile doğrudan orantılıdır. Şekil 5a'da başlangıçtaki durgun durum koşulu gösterilmiştir. Denetim sistemi, akımdaki artışa tepki olarak kıyıcı transfer katsayısını artırır (şekil 5b). Motor akımı aniden değişmeyecektir fakat, şimdi 'A' alanı B'den daha büyüktür ve akımı artıracak şekilde motor endüktansı üzerine net bir gerilim uygulanmaktadır. Akım istenen yeni bir değere çıktığı zaman (şekil 5c) 'A' alanı hâlâ daha büyüktür ve akımın hızla artmaya devam etmesine neden olur. Fakat akımda daha fazla artış, arzulanan değeri aşabilir ve denetim sistemi, kıyıcı transfer katsayısını azaltarak tepki gösterir (şekil 5d).



Şekil 5 Denetim sisteminin tepkisini gösteren motor endüktans gerilimi: a, başlangıç durgun-durumu A: B, b, akım yüksek, b artar, A B, c, yüksek akıma ulaşıldı A B, d, yeni durgun durum için transfer katsayısı azaltılır b düşer A: B

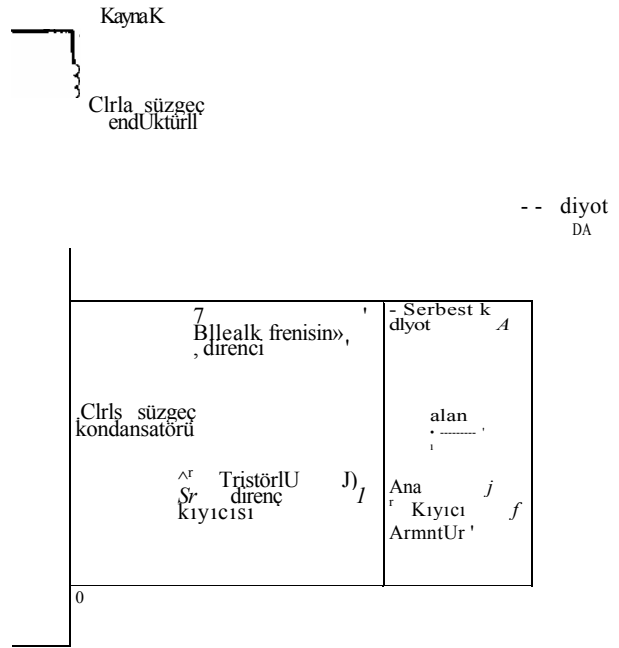
'A' ve 'B' alanları tekrar eşit olduğunda yeni duruma ulaşılabileceği ve 'A'nın pozitif genliği şekil 5a'dakinden daha büyük olduğundan, genişliği daha küçük olmalıdır (toplam genlik V değerinde sabit kalır) yani, kıyıcı transfer katsayısı daha küçük olmalıdır. Böylece baz hızın altında herhangi bir hız için üretilen akımdaki bir artış (yani frenleme gayretindeki bir artış) kıyıcı çalışma süresinde bir azalmaya neden olur.

## ALAN ZAYIFLATMAM YENİ DİZGE

Buraya kadar anlatılanlardan, şekil 4'te b: O çizgisinin üzerinde kararlı bir çalışma noktasının bulunmadığı açıktır, yani baz hızın üzerindeki hızlarda motor akımı, kıyıcının denetimi dışında artacaktır. Frenleme hız sahasını genişletmenin iki olasılığı vardır: devreye direnç sokma veya alanı zayıflatma. Şekil 6'da dört farklı direnç konumu gösterilmiştir.

Her ne kadar bazı alan zayıflatma yöntemlerinde de şekil 6'da R ve R konumlarında gösterilen dirençler kullanılmakla birlikte, enerji tasarrufu açısından alan zayıflatma yöntemi, direnç atma yöntemine tercih edilmekte ve rejeneratif verimliliği en yüksek olan zayıflatma yöntemi, ayrı-uyarımlı motor alanı ile yapılmaktadır.

Şekil 7'de gösterilen devre DA diyotu dışında seri motor için şekil 1 'de gösterilen temel rejeneratif frenleme devresinin aynısıdır. Baz hızdan yüksek hızlarda armatür akımı I'yı alandan atlatarak, alanı zayıflatan ve kararlı çalışmayı sağlayan bu ek diyottur. Bu eylemi anlatmanın başka bir yolu da şudur: DA diyotu akım iletirken (armatür ve alan akımları arasındaki farkı iletir) üzerindeki gerilim, üretilen gerilime göre çok küçüktür ve böylece kıyıcı/SD/alan devresi ve armatür, pratik olarak birbirinden bağımsızdır. Bu nedenle, alanın sağdaki ucu hattın pozitif tarafına bağlıdır (şekil 7'de görüldüğü gibi) ve alan, kıyıcı aracılığı ile armatürden değil de, kaynaktan ayrı uyarılmıştır.

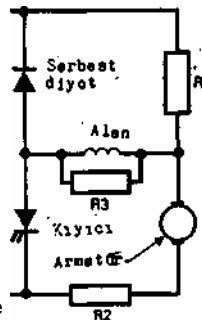


Şekil 7 Alan zayıflatmalı frenleme dizgesi. Bileşik reostatik frenleme devresi kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

. Kaynak  
Ciriş, süzgeç  
endüktörü

Giriş süzgeç kondansatörü

Şekil 6 Ek dirençlerle frenleme dizgesi



## Ayrı Uyarım

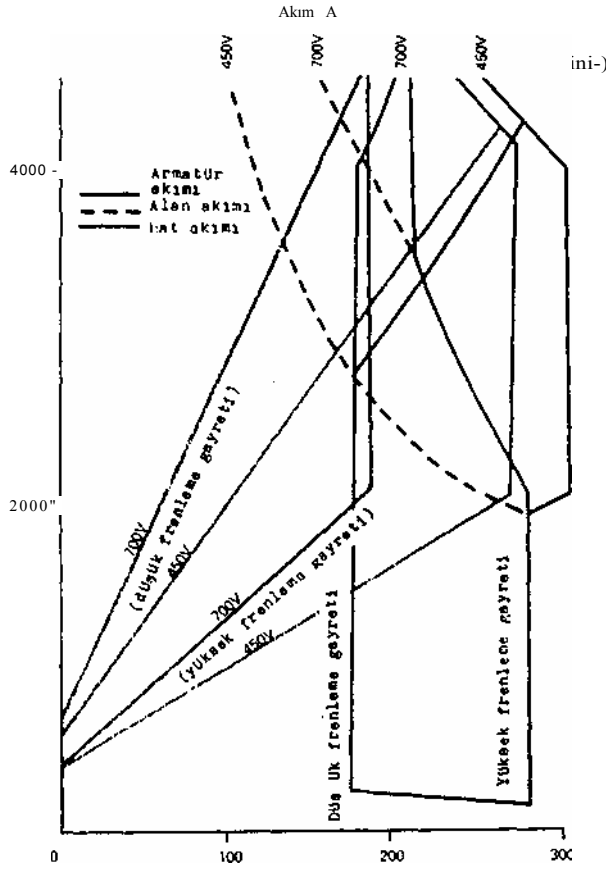
Böylece, yalnızca motor komütasyonu tarafından sınırlanan alan kuvveti, kıyıcı tarafından armatürden bağımsız olarak denetlenebilir ve istenilen ölçüde, armatür akımına göre zayıflatılabilir. Frenleme gayretini hızdan bağımsız kılmak için genellikle alan ve armatür akımlarının çarpımı sabit tutulmak istenir, bu durumda hızı karşı çizilen armatür ve alan akımları şekil 8'de gösterilmiştir. Motorun güç veya komütasyon limitlerine uyması için armatür akımı genellikle azaltılır. DA iletirken,

$$I_f = \frac{k_n \cdot bV_- \sim R_f}{I_f \text{ ve } R_f \text{ sırasıyla alan}} \quad (6)$$

akımı ve direncidir. Böylece, DA iletmezken, alanın aksine kıyıcı transfer katsayısındaki artış, frenleme gayretinde bir artışa neden olur. Altıncı bağıntı çok küçük transfer katsayılarını ima eder ve yüksek hızlarda frenleme, kıyıcı tasarımında önemli kısıtlamalar getirir.

Yüksek hızlarda yeniden üretilen hat akımı, alanı beslemek üzere çok küçük akım değeri gerekl olduğundan, hemen hemen armatür akımına eşittir (armatür akımından daha küçük olan alan akımına, küçük alan gerilimi de denir. Hat gerilimi ile kıyaslandığında bu değer daha da küçüktür), Baz hızın altında, depolama işlevi için daha yüksek aktarımına gerek olduğundan, yeniden üretilen akım, hıza bağımlı olarak ve doğrusal biçimde azalır.

Hat geriliminde ani bir düşme, armatür akımının artmasına neden olur fakat ek akım, alan yerine DA di-yotundan akar ve böylece kıyıcının süratli tepkisi ile birlikte üretilen akımı denetleyen gerilimin artması önlenir.



Şekil 8 Yüksek ve düşük frenleme gayreti ile hat geriliminin iki değeri için frenleme hız-akım eğrileri

## BİLEŞİK REJENERATİF VE REOSTATİK FRENLEME

Yazının giriş kısmında ikinci olarak anlatılan prob-

lem, yani tren iletken ray veya havai hatta bir boşluktan geçerken oluşan ani bir açık devre nedeniyle, süzgeç kondansatörü (Bkz. şekil 1), üretilen akımı kabul edecek ve sonuçta üzerindeki gerilim hızla artacaktır. Terminal gerilimi, sağlıklı çalışma gerilimini (750 V luk hat için 900 V) kapasitans ve akıma bağlı bir zaman süresinde (tipik olarak 1 ms'den az bir süre) aşacaktır.

Açık devre, araçların karşı karşıya kaldığı admittansın sık sık oluşan, olağandışı durumlarından birisidir. Pratikte değişik uzaklıklardaki diğer trenler hızlandıkça veya frenlendikçe admittans sürekli olarak değişir. Böylece, kaynak gerilimini trene özel nominal değerinde veya ona yakın bir değerde tutmak için devreye sürekli değişen bir reosta sokulabilir ve zaman zaman oluşan kaynak admittans eksikliği karşılanabilir. Şekil 1 'de gösterilen tristörlü ve dirençli basit rejeneratif dizgeye, bileşik reostatik frenleme kolaylıkla eklenebilir.

"Bırakma" sürecinde herhangi bir anda, hat kaynağı üretilen akımı alamazsa, tristör ateşlenir ve akım, kaynaktan ve SD'tan geçmeksizin, direnç üzerinden tekrar armatüre aktarılır. "Bırakma" süresinin sonunda ana kıyıcı ve hem de tristör TR, ana kıyıcı komütasyon devresi tarafından söndürülür.

Böylece bırakma süresi, şekil 9'da gözlemlendiği gibi, bir rejeneratif moda (TR ateşlenmeden önce) ve onu takiben bir reostatik moda (TR iletken) ayrıştırılır.

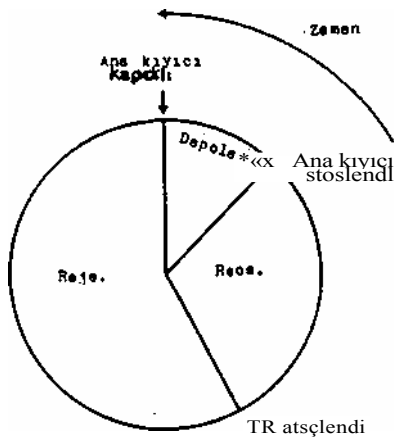
Direncin değeri, maksimum akımda üzerindeki gerilim, yüksüz hat geriliminden büyük olmayacak şekilde ve hafta bağlı yardımcı elemanların zarar görmeden çalışmalarını sağlayacak biçimde seçilir. Bu, klasik reostatik frenlemenin tam zıttıdır çünkü, orada motorun daha iyi çalışmasını sağlamak için motor devresi hat kaynağından ayrılır ve gerilimin en azından iki katına çıkmasına izin verilir.

Kaynağın geri beslenmesi, iletken-ray gerilimi veya giriş süzgecinin motor tarafından kondansatör gerilimi ölçülerek daha doğru olarak bulunur. Kondansatör üzerindeki gerilim, yüksüz hat geriliminin üzerine çıkarsa, kaynak geri beslenemez ve direnç devreye sokulur, (direnç, SD yüzünden kondansatörü boşaltmaz, fakat sadece geriliminin yükselmemesini sağlar.)

Alan Zayıflatma İle Birleştirme Anlatılan bu sistem, alan-zayıflatma dizgesi ile (şekil 7) doğrudan kullanılamaz çünkü alanın endüktif doğası nedeniyle, üretilen tüm akım dirence aktarılamaz ve ( $I_a - I_f$ ) akımı DA diyotundan geçerek iletken raya

akmaya devam eder. Bunun yerine direnç şekil 7'de gösterildiği gibi tüm devrenin karşısına bağlanmalıdır. Bu konumda TR tristörü, kendi komütasyon araçları bulunan bir kıyıcı ile yer değiştirir.

Direnç kıyıcısı, ana kıyıcı ile aynı çevrim süresine sahiptir fakat, transfer katsayısı, ana kıyıcının transfer katsayısından bağımsız olarak denetlenir. İki tane elektronik servo sistemi bulunur: birisi arzu edilen armatür akımının ana kıyıcı ile korunmasını, diğeri de süzgeç kondansatörü üzerindeki gerilimin direnç kıyıcısı aracılığı ile sınırlanmasını gözetir. Böylece herhangi bir anda kıyıcıların biri, her ikisi veya hiçbiri iletebilir fakat genelde her kıyıcı çevrimi, şekil 9'da görüldüğü gibi 'depolama', 'rejeneratif ve 'reostatik' evrelere bölünebilir.



Şekil 9 Kıyıcı çevrimi

Buna karşılık, giriş süzgecinin ortalama etkisi nedeniyle, evreler arasındaki anahtarlama, araçlarca harici olarak anlaşılabilir. Üretilen hat akımı çok küçük bir dalgacığa sahiptir, çünkü giriş süzgeç endüktörünün varlığı, onun bir tek kıyıcı çevrimi süresinde değişmemesini sağlar ve rejeneratif evre süresinde hat akımı üzerindeki aşırı armatür akımı, süzgeç kondansatörü tarafından emilir.

Reostatik mod süresince kondansatörden akan akım, sadece süzgeç endüktöründen değil, aynı zamanda frenleme direncinden de geçer. Değişik depolama ve enerji bırakma nedeniyle, süzgeç kondansatörü üzerinde önemli ölçüde bir dalgacık bulunur, fakat bu, yukarıda anlatıldığı gibi maksimum olası motor akımına eşit olması gereken frenleme-direnci akımının, TR'ün iletim süresince, tüm kıyıcı çevriminde ortalamasının alınması demektir böylece bunun etkisi, motor akımı-

nın alan devresi tarafından emilemeyen veya hat'ta geri döndürülemeyen kısmına uygun (hat geriliminde) değerinde bir frenleme direncini, kaynak karşısında bağlamakla eşdeğerdedir.

#### Denetim-sistem i Kararlılığı

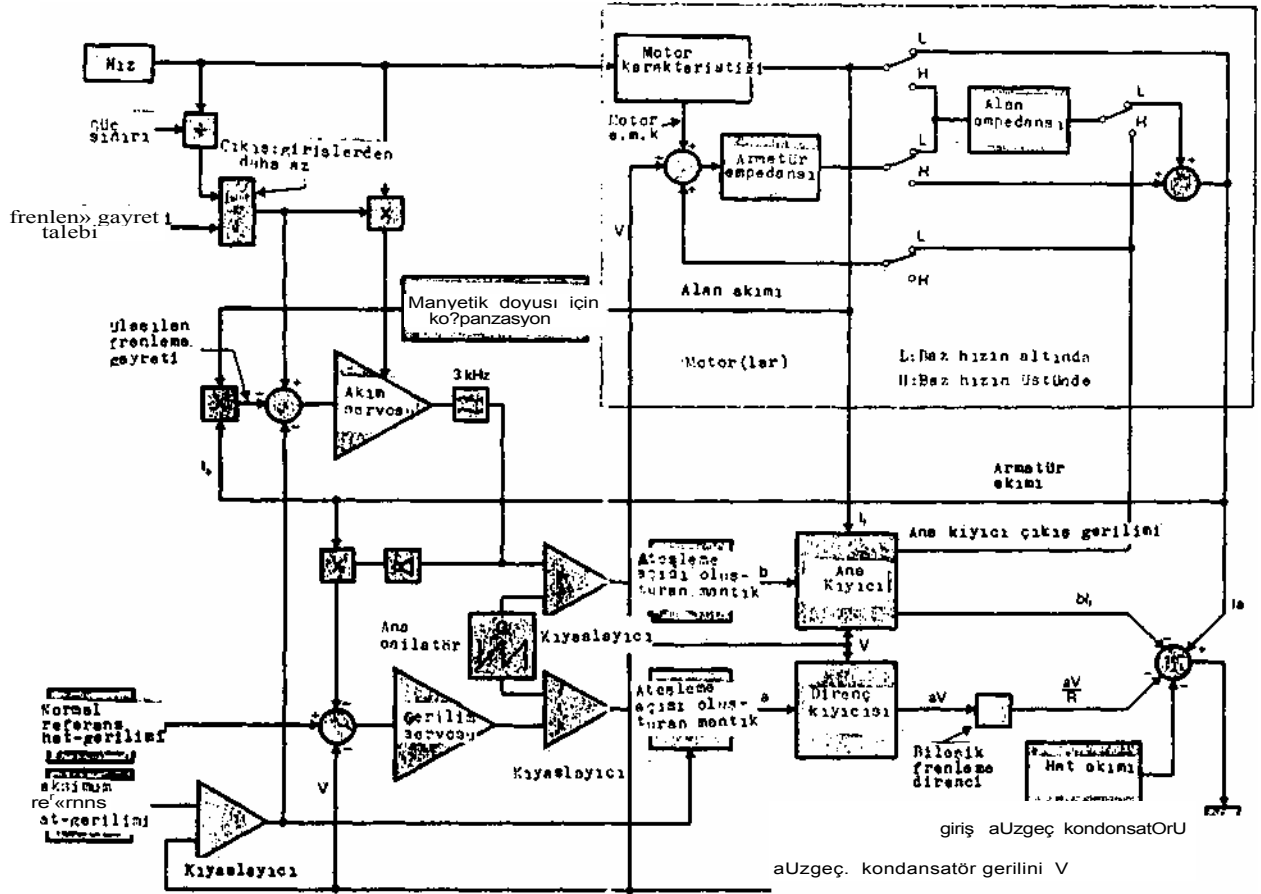
Gerilim ve akım servolarının her ikisinin de frekans tepkileri, motor ve giriş süzgecinin de içeren tüm sistemin kararlılık analizinden sonra tasarımı yapılır. Sistemin benzetimi, denetim problemi için bir önsezgi sağlar fakat kıyıcının, motor ve reostatik bileşiği süresiz darbeler aracılığı ile denetlediği gerçeğini ihmal eder. Örneğin bu tür benzetim, pratikte orantı artı entegral olması gereken gerilim servo'su için orantı karakteristiğinin yeterli olduğunu ve referans geriliminin, rejeneratif akımla orantılı olarak azaltılması gerektiğini belirtir. Örneğin, referans gerilimi nominal olarak 750 voltluk bir sistemde üretilen akıma göre, maksimum akımda 770 V'tan, küçük bir akımda 820 V'a kadar ayarlanır. Gerilimin bu şekilde bir sahaya yayılmasının amacı, rejenerasyonun trenler arasında bölüşümünü sağlamaktır.

Baz hızın üstünde frenleme için kullanılan akım servo'su da orantı artı entegral türündedir fakat kıyıcı, motor ve giriş süzgecinin girişimi nedeniyle oluşan hat akımı dalgacığını azaltmak üzere 20 Hz ve 200 Hz frekanslarında yapılan ayarlama ile daha düşük kazançtır (yaklaşık bir).

Çok fazla kazanç, aşırı akım dalgacığı sınırlı-çevrim çalışmasına ve fakat alan uyarımının kıyıcı ile denetimi doğrudan yapıldığından, düşük kazançla elde edilebilen frenleme gayretinde (istenilen değer yaklaşık %5'i) kabul edilebilir küçük hatalara neden olur.

Baz hızının altında frenleme için, alan uyarımının kıyıcı denetimi ters olduğundan, kazancı 3 kHz'e kadar (bu frekansta gürültü sınırlayan bir süzgeç çalışmaya başlar) tüm frekans sahasında yaklaşık 30 dB kadar artırmak gerekir. Kazanç, aşırı akım dalgacığı oluşturmaksızın, kıyıcı ve sistemininkinden daha yüksek olmalıdır ve motor hızı ile orantılı olarak artırılır (baz hızda 30 dB). Bundan başka, motorun manyetizasyon karakteristiği ve endüksans, akımın fonksiyonları olduğundan kazanç, arzu edilen gayrete göre ayarlanabilmelidir, fakat motor akımı depolama işlevine aktarıldığı sürece en büyük olası akım, hızla doğru olarak düştüğünden, küçük-kazanç modunda kullanılan kazancın 20 Hz'te ayarlanması gerekmez.

Tüm denetim sistemi şekil 10'da gösterilmiştir. Servo karakteristiklerini her motor için ve her uygulamada kullanılan giriş süzgecine göre dikkatlice seçmek ve en önemlisi, kıyıcının yeteri kadar küçük çıkışa sahip olması gereklidir.



Şekil 10 Denetim-sistemi blok seması: a sinyali direnç kıyıcısının, b sinyali de ana kıyıcının transfer katsayısıdır.

## SONUÇ

Yarı iletken teknolojisinin demiryolu taşımacılığına uygulanması, mühendisleri, kullanılan araçların her parçasının karakteristiğini daha ayrıntılı olarak incelemeye yöneltmiştir, özellikle motorların geçici tepkileri ve denetim araçları, büyük önem kazanmıştır. Bunları daha iyi anlamak, ulaştırma mühendisliğinin diğer konularına da kazançlar sağlamıştır.

Güç elektroniği araçlarının denetimi de zorunlu olarak elektrondir ve her ne kadar (şekil 10'da görüldüğü gibi) devreler eskilere oranla çok daha karmaşık olu makla birlikte, denetim elektroniğinin pratik çalışması daha kolaydır ve ayrıca sistemin gelişmesi için uygun çabalar sarfedilirse, aynı zamanda daha güvenilirdir. Ayrıca elektroniğin varlığı, tren denetimi için karmaşık fakat arzu edilen gereksinmelerin (örneğin

enerji tüketimini azaltacak hız denetimi) birkaç entegre (tümleşik) devre veya yeni bir mikroişlemci programı ile sağlanabilmesi olanağını getirmiştir.

Danimarka Demiryollarında kullanılan çok-üniteli tren setlerinde burada anlatılana benzer, otomatik alan-zayıflatma ve bileşik rejeneratif ve reostatik frenlemeli bir hız-denetim sistemi ile bir güç sistemi bulunmaktadır. Bu trenlerin kıyıcısız olanlara göre %13'ün üzerinde enerji tasarrufu sağladığı kanıtlanmıştır.

## KAYNAK:

VAGNER, R. and VVOLSKI, A: Batterie-Triebfahrzeuge mit Gleichstromsteuerung über Sillium-Stromtore, Elektrische Sahren, 1964,294-301.