

22059

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ • FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POMPALARDA VE FANLARDA DEĞİŞKEN HIZLI TAHRİK İLE
AKIŞ KONTROLU VE ENERJİ TASARRUFU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk.Müh. İsmail KARTAL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31 Ocak 1992

Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Şubat 1992

Tez Danışmanı : Prof.Dr.M.Emin TACER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr.Nurdan GÜZELBEYOĞLU
Prof.Dr.Faik MERGEN

ŞUBAT 1992

ÖNSÖZ

Değişken hızlı tahrik sistemlerinin uygulamalarından biri olan "hız ayarı ile akışkan kontrolü" son yıllarda üzerinde bir çok araştırma yapılan ve sanayide uygulanmaya başlanan bir yöntemdir. Fakat Ülkemizde bu konunun yeterince bilinmediği veya kullanıcıya anlatılmadığı kanısındayım.

Bu çalışmanın amacı şimdiye kadar bu konu üzerine yazılmış literatürden faydalanarak sistemin yapısı hakkında bilgi vermek ve somut örneklerle sağlayacağı enerji tasarrufunun hangi boyutlarda olduğunu göstermektir.

Bu tezi hazırlamamda büyük katkıları olan danışmanım Sayın Prof.Dr.M.Emin TACER'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Ayrıca değerli yardımlarından dolayı bütün arkadaşlarıma ve sevgili Gül TUĞRUL'a içten teşekkürlerimi sunarım. Tezin yazılmasında emeği geçen Sema ORTABOY'a da teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
SUMMARY	vi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Değişken Hızlı Tahrik Sistemlerinin Üstün- lükleri	2
BÖLÜM 2. ASENKRON MAKİNA KONTROLU	4
2.1. Asenkron Makinanın Dinamik Modeli	4
2.1.1. Eksen Dönüşümü	5
2.1.2. Senkron hızda Dönen Referans Sistemi	8
2.1.3. Üretilen Moment	11
2.1.4. Durağan Referans Sistemi	12
2.2. Asenkron Makina Kontrolünün Karakteristik- leri	12
2.3. Skalar Kontrol Yöntemleri	15
2.3.1. Gerilim Kaynaklı Evirici Kontrolü	15
2.3.1.1. Gerilim/Frekans Kontrolü	15
2.3.2. Akım Kaynaklı Evirici Kontrolü	19
2.3.2.1. Bağımsız Akım ve Kayma Kontrolü	19
2.3.2.2. Programlanabilir Akım Kontrolü ve Sabit Akıllı Çalışma	21
2.4. Vektör Kontrol Yöntemi	24
2.4.1. Doğrudan Vektör Kontrol	27
2.5. Harmonik Yoketme Yöntemi	33
2.6. Akım Kaynaklı Eviricinin Gerilim Kaynaklı ile Karşılaştırılması	37
2.7. G.T.O. Tristör ve Sabit Hızlı Bir Asenkron Motorun Değişken Hızlıya Dönüştürülmesi ...	39
2.7.1. Elde Edilebilir Güç Değerleri	41
2.7.2. G.T.O.-IMD Sistemi	42
2.7.3. Kapıdan Kesime Götürülen Tristör	45
2.7.3.1. Basitleştirilmiş İşletim Teorisi	46
2.7.4. G.T.O.-IMD verimi	48
2.7.5. Güç Faktörü	49
2.7.6. Termik Isınma	51
2.7.7. Gerilim Salınımları	51
2.7.8. Moment Salınımları	52
2.7.9. Kontrol Sistemi	54
2.7.10. Arıza Arama	54
BÖLÜM 3. POMPA, FANLAR VE KOMPRESÖRLER	55
3.1. Genel	55
BÖLÜM 4. DEVİR SAYISI AYARI İLE AKIŞKAN KONTROLÜNÜN DİĞER YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI	67

4.1. Çıkış vanası ya da damperi	68
4.2. Giriş Vanası	69
4.3. Dolandırma veya By-pass Sistemi	69
4.4. Hız Kavramaları	72
4.5. Gaz Akış Kontrolunda Enerji Tasarrufu	72
4.6. Sıvı Akış Kontrolunda Enerji Tasarrufu	73
BÖLÜM 5. KULLANILAN ENERJİNİN HESAPLANMASI VE EKONOMİK	
DEĞERLENDİRMESİ	77
5.1. Gerekli Bilgiler	77
5.1.1. Karşılaştırılacak Akış Kontrol Yöntemleri	
5.1.2. Pompa ya da Fan Verileri	78
5.1.3. İşletme Bilgisi	78
5.1.4. Bütün Elektrik Sisteminin Verimleri	78
5.2. Hesaplama Yöntemi	79
5.3. Örnek Uygulamalar	79
5.3.1. Soğutma Kule Fanları	83
5.3.2. Slab Fırını Yanma Havası Fanı	84
5.3.3. Kireç Fabrikası Toz Toplama Fanı	86
5.3.4. Su Tesisleri Filtre Suyu Pompaları	89
BÖLÜM 6. SONUÇ	91
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Pompa, fan veya kompresör gibi santrifüj yükler ve ya akışkan tahrik sistemleri dünyada üretilen elektrik enerjisinin büyük bir bölümünü tüketmektedir. Bu sistemlerde eskiden beri tahrik motoru olarak sabit hızlı asenkron motorlar kullanılmaktadır. Bu durumda akışkan kontrolu vana damper gibi ek düzeneklerle sağlanmaktadır. Bu düzenekler sistemde ek kayıplara neden olarak büyük bir enerji harcanmasına neden olmaktadır.

Son yıllarda bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda tahrik motoru olarak değişken hızlı asenkron motor kullanılmasının daha faydalı olacağı anlaşılmıştır. Bu tür bir uygulamada hem akışkan kontrolu için ek bir düzeneğe ihtiyaç kalmaz hem de büyük miktarlarda enerji tasarrufu sağlanır.

Bu çalışmada şimdiye kadar bu konuda yapılan çalışmalar açıklandıktan sonra, sistemin elemanlar ve kontrol açısından işlevleri önce açıklanmış, sonra da Ereğli Demir ve Çelik Fabrikalarında konu ile ilgili olarak yaptığım çalışmalar verilmiştir.

Tezin birinci bölümünde konunun tanıtılması ve değişken hızlı tahrik sistemlerinin üstünlükleri açıklanmıştır.

İkinci bölümde Asenkron makina kontrolunun prensipleri, asenkron makina kontrol yöntemlerinden olan skalar ve vektörel kontrolü açıklanmış ve ayrıca bu bölümde konuya yönelik düzenlenmiş bir sistem olan G.T.O-IMD sistemi hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde pompalar ve fanlar hakkında bilgi verildikten sonra, dördüncü bölümde devir hızı ayarı ile akışkan kontrolu ve diğer yöntemlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Beşinci bölümde kullanılan enerjinin hesaplanması ve ekonomik değerlendirmesi yapılmış, ayrıca bu değerlendirme için bir hesap yöntemi verilmiştir. Bu hesap yönteminin uygulaması Erdemir'deki bazı sistemler için verilmiştir.

Altıncı bölümde ise sonuçlar verilmiştir.

SUMMARY

FLOW CONTROL ON PUMPS AND FANS BY USING A.C. ADJUSTABLE DRIVES AND ENERGY SAVINGS

A procedure is offered for the evaluation of the energy savings obtained by the use of ac adjustable speed drives on pumps-fans and other types of driven equipment such as compressors or extruders and mixers. A method for the economic evaluation of the energy savings is also offered.

The Advantages of Using AC Adjustable-Speed Drives

The advantages gained by using ac adjustable-speed drives (here after referred to as ASD's or ac drives) on pumps, fans, compressors and other equipment have been widely publicized in recent years and their use in industry has been on increase. Some of the primary advantages they offer may be summarized as follows.

1. Energy is saved in the proses as compared with constant speed drives which utilize throttling valve on pumps or in let guide vanes and damper on fans.

2. Where the proses requires adjustable speed ac drives are more efficient than adjustable-speed coupling and have maintenance advantages.

3. The soft starting characteristic softens the starting shock on motor, couplings, gears, and driven equipment.

4. Any number of repetitive restarts is allowed for checkout and balancing at start up time.

5. Rated speed in excess of 3000 rpm are a possibility without using a gear since it is possible for ac inverters to operate a frequencies considerable in excess of 50 Hz.

6. The permissible range of flow control is generally higher with adjustable speed.

Although the preceding list demonstrates there are many reasons to apply ac drives other than just energy savings, normally this is the primary justification for the use of ac adjustable speed drives.

It is probably safe to say that in the majority of existing constant-speed drive applications in industry, some energy can be saved with the use of ac adjustable-

speed drives.

Since ac drives are a sophisticated and costly piece of equipment, the degree of energy savings in a given application must be sufficiently large to justify a relatively large initial expenditure.

Control of Induction Machines

The control of ac machines is considerably more complex than that of dc machines and this complexity increases if stringent performance specifications are demanded. The complexity arises because of variable frequency power supply, ac signals processing, and complex dynamic of the ac machines. The induction machines can have various methods of control, and the particular method to be adapted depends on the nature of the application. The decision on control strategy should be based on the following general questions:

1. What types of power converters should be used?
2. Should the control be open loop or closed loop?
3. Is it a position-speed-or torque-controlled system?
4. Should it be a one-quadrant, two-quadrant, or four-quadrant drive system?
5. What are the accuracy and response-time requirements?
6. Is it a single-machine or a multimachine drive?
7. What is the range of speed?
8. Do pulsating torque, harmonics and power factor need control?

The induction motor drive system is basically a multivariable control system, and therefore in principle the state variable control theory should be applicable. Here the voltage and frequency are the control inputs and the outputs may be speed, position, torque, air gap flux, stator current, or any combination of them. The machine model given by equations (1), (2), (3) is nonlinear because of the presence of the ω_r term in the impedance matrix of equation (1) and produced terms in equation (3). In addition, the parameters of the machine may vary with saturation, temperature and skin effect, adding further nonlinearity to the system. The system is also discrete time because of the sampling nature of the converters. The discrete time effect of the converters and controller can, of course, be neglected if the machine is sluggish, which is normally the case.

$$\begin{bmatrix} V_q^s \\ V_d^s \\ V_q^r \\ V_d^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & \omega_e L_s & PL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_r L_s & R_s + PL_s & -\omega_e L_m & PL_m \\ PL_m & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + PL_r & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & PL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \\ i_q^r \\ i_d^r \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e - T_L = j \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{2}{p} j \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2}\right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3)$$

As mentioned before the induction motors can be controlled with various control methods. The scalar control and vectoral control are two of them in the scalar control, only the magnitude of the variables are controlled. The command and feed back signals are dc quantities which are propotional to the respective variables. This is in contrast to vector control where both magnitude and phase of a vector variable are controlled. Both of the control methods are achieved by using current fed inverters or voltage fed-inverters.

Commutation in an inverter for large medium voltage induction motor adjustable-speed drives has been cumbersome in the past. It has required relatively complicated circuitry which might have included large capacitor banks and special commutating circuits. As a results, progress in converting existing fixed speed induction motors to adjustable-speed drives for fans, pumps compressors and blowers to save energy has been slow. Recently a breakthrough in the design of an induction motor drive utilizing Gate-turn-off thyristors greatly simplified commutation, thus making retrofits more feasible with less complicated inverters. One of the major advantages of the Gate-turn-off technology is a nearly sinusoidal output wave form for the motor. If the system is directed for use with existing induction motors, down time and expense for conversion to adjustable speed can be greatly reduced. Less investment is needed and payout time is shortened.

Pump and Fan Evaluation

Centrifugal pump and fans probably represent the major opportunity for ac adjustable-speed drive applications, certainly in new installations but especially for the retrofit of existing installations. Centrifugal pumps and fan's have been used in industry in conjunction with constant speed electric motors as drives. Flow control has traditionally been acomplished in the process by methods involving a considerable expenditure of energy as a necessary trade-off for having that control. ASD's provide the opportunity of allowing the same degree of flow control without the losses in the proses.

The flow control and energy savings by using ASD's on pumps and fans can be explained with power equation and fan laws. The power required by pumps and fans is shows in equation (4).

$$P_m = \frac{Q \cdot P}{\eta_p} \quad (4)$$

P_m : Power given by motor in kW

Q : Flow rate in m^3/h

P : Developed pressure (or head) in N/m^2 or m.

η_p : Pump efficiency

Virtually every paper on the subject of adjustable-speed drive evaluations for centrifugal pumps and fans cites the "fan laws" relative to the effect of speed reduction on system performance. These laws define the relationship between speed, flow, head and power as follows.

$$\frac{n}{n_1} = \frac{Q}{Q_1} \quad (5)$$

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{Q}{Q_1}\right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{P_m}{P_{m1}} = \left(\frac{Q}{Q_1}\right)^3 \quad (7)$$

It is critical to note that (5), (6) and (7) are only useful in describing the shift that occurs with pumps or fan curves when changing from one speed to another. In actual applications the power required by pump or fan may not be reduced to the cube of flow. This is because the pump or fan head developed at reduced flows and speeds is a function not only of the pump or fan characteristics, but also of the nature of the system in which the equipment is installed.

The required system head characteristic that must be matched by the developed pumps head is made up of two components, the static head and frictional head. A pumping or fan system can have the two components in virtually any proportion depending on the application, but the head required at reduced flow conditions, and thus the horse power can vary dramatically, depending on what those proportions are. This is because static head has constant characteristic across the flow range whereas frictional head will normally vary with the square of flow. Because of this, the energy savings at reduced speeds will be considerably different for the two system.

As a consequence while horse power will drop a slight amount for the constant-speed case with throttling, it will go down as the cube of the flow for adjustable-speed application.

Energy Usage Evaluation and Financial Analysis

It can be noted that the important and difficult part of an adjustable-speed energy savings analysis is the data gathering and determination of the shaft power required by the pump or fan under the various operation conditions. The following is a summary of a suggested evaluation procedure from that point on.

1. Calculate the required pump or fan power for each flow case for ASD's and the base comparison system using (4)
2. For each flow condition for the ASD and the base comparison system, determine actual load efficiencies of the electrical components of each drive system and calculate the total input kilowatts according to (8)

$$P_g = \frac{P_m}{\eta_d \cdot \eta_m \cdot \eta_h \cdot \eta_t} \quad |kW| \quad (8)$$

P_g : input kilowatts

P_m : shaft power

η_d : Gear efficiency

η_m : motor efficiency

η_k : control system efficiency

η_t : transformer efficiency

Note: Delete the efficiency in the preceding formula for any component that is not present.

3. Determine the total energy useage for each flow conditions for both of the system (assuming an annual evaluation period)

$$E_g = P_g \cdot t \cdot 8,76 \quad |MWh| \quad (9)$$

t: p.u of time at flow condition.

4. Determine the total annual energy consumed by ASD and base comparison system at every flow conditions. The difference between the total energy consumption for each case is the energy saving.

A simple payback calculation taking only power costs into account may be sufficient to determine project viability, based on an assumed energy cost as in (10)

$$T_g: \text{Pay back time (years)} = \frac{\text{Total project cost}}{\text{Energy cost TL/kWh} \times E_g} \quad (10)$$

A more sophisticated financial analysis tool may be warranted. There are two widely accepted measurements of a project viability; the simple time to payback (T_g) and the return on investment (K).

The K is more sophisticated measurement than the T_g since it recognizes the time value of money. The relationship between investment, saving and K is indicated by (11)

$$Y = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left| \frac{s}{(1-K)^n} \right| \quad (11)$$

Where

Y : initial capital expenditure in TL

s : Yearly savings in TL

n : year

$n_{\max}$: length of evaluation period, in years

K : return on investment, in per unit.

A simple way to look at the K is that it would be equivalent to the interest rate you would receive if you took the money spent on a capital project and instead invested it in a CD at your bank.

1. If the annual energy saving and K is determined. Over an evaluation period the investment can be calculated from (11) and the result is compared with the initial investment. For the project economic viability the initial investment cannot exceed the result.

2. Normally the initial investment is known and is required to calculate the percent K . For the economic viability the K should be equal or greater than interest rate.

In order to do this calculation by hand the iterative calculation or infinite series must be made first. If the equation (11) is written as an infinite series, it will probably equal to the term of (12)

$$Y = s \left| \frac{(K-1)^n - 1}{K(K-1)^n} \right| \quad (12)$$

It is easy to do this calculation by computer as illustrated by the examples from Ereğli iron and steel works in the last section.

BÖLÜM 1.

GİRİŞ

Dünyada üretilen elektrik enerjisinin büyük bir bölümü pompa, fan, üfleyici ve kompresör gibi santrifüj ya da akışkanların tahrik sistemlerinin çalıştırılması için harcanmaktadır. Bu sistemlerin tahrikinde günümüzde çoğunlukla asenkron motorlar kullanılmaktadır. Diğer yandan, akışkan tahrik sistemlerinde çıkış büyüklüğü olarak elde edilen debi, basınç gibi büyüklüklerin genelde değişken olması istenir. Bu durumda eğer tahrik, sabit hızlı bir motorla yapılıyorsa, çıkış büyüklüklerinin değiştirilmesi için bazı ek düzenlerin kullanılmasına ihtiyaç vardır. Bunun için kullanılan düzeneklerden başlıcaları, valfler, çıkış damperleri, giriş vanaları ve difüzyon birimler, mekanik hız dönüştürücüler ve by-pass ünitesi gibi dolaşım sistemleridir. Bu düzenlerin kullanılması, sistemde debi ayarı için akışkanın aktığı kesiti değiştirmesi dolayısıyla ek kayıplara neden olmaktadır.

Akışı kısıtlayan bu düzenler, sisteme girişten verilen enerjinin bir kısmının sürtünme kayıpları ve ısıya dönüşmesine neden olarak sistem verimini düşürürler. Bu tür bir akışkan kontrolü, enerjinin büyük bir kısmının boşa harcanması yanında sistemde gereksiz aşınmalara neden olur. Ayrıca, günümüz endüstrisinde santrifüj veya akışkan tahrik sistemlerinin çokça rastlandığı sektörlerden biri olan demir-çelik sektörünü gözönüne alırsak, sürekli yükselmekte olan ürün kalitesi ve gitgide küçülen toleranslar bu makinelerin, çok hızlı ve hassas şekilde kontrol edilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Bu ihtiyacın, gelecekte daha şiddetli olacağı beklenmektedir.

Bu ihtiyacın karşılanması için, sürekli çalışma şartlarını etkileyen değişkenlerin kontrol edilmesi gerekir. Bu tezin temelini oluşturacak olan "Değişken hızlı tahrik sistemlerinin akışkan kontrolunda kullanılması" ile hem istenilen ihtiyaca cevap verilecek, hem de yukarıda belirttiğimiz sakıncalar ortadan kaldırılacaktır. Dolayısıyla büyük miktarlarda enerji tasarrufu sağlanmış olacaktır.

1.1. Değişken Hızlı Tahrik Sistemlerinin Üstünlükleri

Fanlar, pompalar, kompresörler ve diğer akışkan tahrik sistemlerinin tahrikinde değişken hızlı tahrik sistemlerinin kullanılması bir çok üstünlük sağlar. Bu tür uygulamalar son yıllarda gün geçtikçe artmaktadır [1]

Bu sistemlerin sağladığı üstünlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. İşletme sırasında vana, damper, dolaştırma üniteleri gibi sabit hızda akışkan kontrolu yapan düzenlere göre enerji tasarrufu sağlanması,

2. Değişken hız gerektiren işletmelerde, mekanik hız dönüştürücülere göre daha verimli ve daha az bakım gerektirmeleri,

3. Yumuşak kalkış karakteristiği ani kalkışta motor, kaplin veya dişli üzerine gelecek şokları yok eder, böylece sistemdeki arızaları azaltması,

4. Yüksek hızlarda çalışan makinelerin, balans ayarı ve kontrolu için ardarda çok sayıda kalkış/duruş yapmaya olanak sağlaması,

5. Değişken hızlı tahrik sistemleri öyle düzenlerdir ki; değişen işletme şartlarına kolayca uyum sağlar. Örneğin; güç devresinde önemli bir gerilim düşümü meydana geldiği zaman kontrol sistemi makinayı yavaşlatarak, normal şartlar oluşuncaya kadar gerekli güç miktarını azaltması,

6. Yardımcı bir düzene gerek duymadan geniş sınırlar içerisinde hız ayarı yapmaya olanak sağlaması,

7. Sistemin cevap verme süresi çok kısa olduğundan, taşma, ısınma, titreşim gibi problemlerin ortaya çıkması halinde, kontrol süresi diğer sistemlere göre daha iyi olması,

8. Bilinen diğer sistemlerin çalıştırılmasında kullanılan işgücüne ihtiyaç duymadığı için işgücünden tasarruf sağlaması,

9. Akışkan miktarının ürün kalitesi üzerine etkili olduğu işletmelerde hassas kontrol yaparak istenilen kaliteyi sağlaması.

Bilinmesi gerekir ki, yukarıda sayılan avantajların bir çoğu hem a.a., hem de d.a. sistemler için geçerlidir. Fakat yüksek güçlerde d.a. motor temin edilmesinin güçlüğü, komutatör ve fırça bakımı, çalışma alanlarının sınıflandırılması gibi nedenlerden dolayı d.a. sistemler daha az tercih edilmektedir. Genede bazı uygulamalarda d.a. sistemler hala alternatif olarak kabul edilmektedir. Yukarıda sıraladığımız nedenlerin önemi enerji tasarrufundan daha küçüktür. Birinci neden enerji tasarrufudur.

BÖLÜM 2.

ASENKRON MAKİNA KONTROLÜ

Alternatif akım makinalarının kontrolü, doğru akım makinalarının kontrolünden çok daha karmaşık hale gelebilir.

Bu karmaşıklık, değişken frekanslı besleme sinyali işleme ve a.a makinaların dinamiğinden kaynaklanır. Asenkron makinalar, uygulamanın yapısına bağlı olarak çok çeşitli şekillerde kontrol edilebilirler. Kontrol stratejisini belirlemek için, aşağıdaki soruların cevaplandırılması gerekir [2].

1. Ne çeşit güç çevirici kullanılmalıdır?
2. Kontrol, kapalı çevrim mi, yoksa açık çevrim mi olmalıdır?
3. Konum/hız/moment kontrolü mu yapılacak?
4. Tek bölgeli, çift bölgeli, dört bölgeli çalışma mı yapacak?
5. Hassasiyeti ve zaman sabiti ne kadar olmalı?
6. Kontrol sistemi tek makinalı mı? Çok makinalı mı?
7. Harmonikler, güç faktörü ve moment salınımları kontrol edilsin mi?

2.1. Asenkron Makinanın Dinamik Modeli

Değişken hızlı kontrol sistemlerinde, makina normal olarak geri besleme çevrimi içersinde bir işaret üretir. Bu yüzden makinanın dinamik hareketi gözönüne alınmalıdır. A.A. makinanın dinamik davranışı, rotor ve stator fazlarının karşılıklı etkileşmelerinden dolayı biraz karışıktır. Bu karşılıklı etkiden dolayı katsayılar rotor konumuna göre değişmektedir. Bu nedenle makina modeli zamanla değişen katsayılı diferansiyel denklemlerle tanımlanır. Genellikle

dönüştürücü ile beslemede olduğu gibi eğer güç kaynağı dengeli üç faz ise, dinamik modeli oluşturmak için iki eksen ya da d-q teorisi kullanılır. Bu teoride, zamanla değişen katsayılar yok edilir ve değişkenler ve parametreler birbirine dik (ortogonal) d ve q eksenlerinde yazılırlar. Bir makinanın d-q dinamik modeli sabit veya dönen koordinat sistemlerde yazılabilir. Sabit koordinatlarda d ve q eksenleri statorda sabitlenmiş gibi düşünülür. Buna karşın döner koordinatlarda bu eksenler dönmektedir. Bu döner koordinatlar ya statorda sabitlenmiş, ya da senkron hızda hareket ediyormuş gibi düşünülür. Senkron hızda dönen modelin avantajı sinüsoidal beslemeli sürekli çalışmada değişkenler d.a. büyüklükler olarak görünür [2].

2.1.1. Eksen Dönüşümü

Stator besleme gerilimleri ve a_s - b_s - c_s ve d^s - q^s eksenleri arasındaki dönüşüm ilişkilerinin her ikisi de durağan sistemde olduğunu düşünelim. Akım ve akı gibi diğer büyüklükler benzer durumda dönüştürülebilir. θ açısı, dik eksen sistemi arasında rasgele bir açı olsun. d^s ve q^s sisteminde, faz gerilimleri, matris formunda yazılabilir [2].

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-120^\circ) & \sin(\theta-120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta+120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{es}^s \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

buna göre ters dönüşüm de şöyledir;

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{es}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

V_{es}^s sıfır bileşenidir ve dengeli üç faz beslemede sıfır bileşeni oluşmaz.

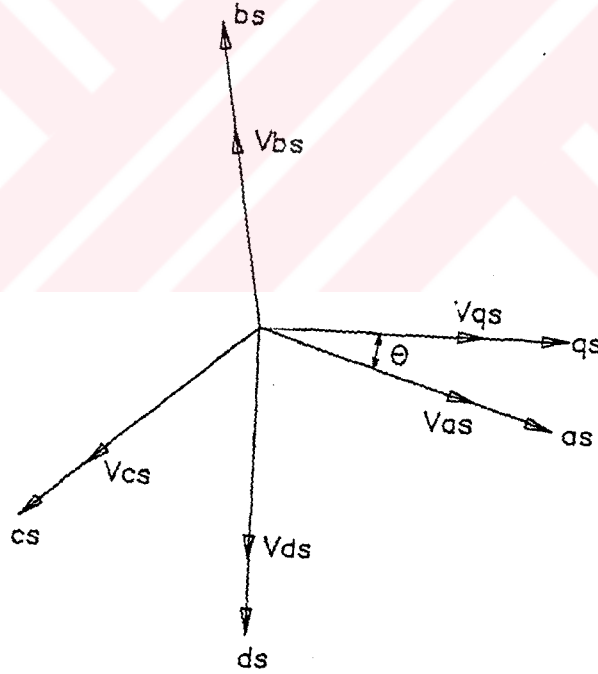
Kolaylık olması için θ açısı sıfır kabul edilir ve as eksenini qs eksenine ile çakıştırılır. Aynı zamanda sıfır bileşeni ihmal edildiğinde dönüşüm bağıntıları şöyle olur:

$$V_{as} = V_{qs}^s$$

$$V_{bs} = -\frac{1}{2} V_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{ds}^s \quad V_{qs}^s = \frac{2}{3} V_{as} - \frac{1}{3} V_{bs} - \frac{1}{3} V_{cs} = V_{as}$$

ve

$$V_{cs} = -\frac{1}{2} V_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{ds}^s \quad V_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}} V_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{cs} \quad (2.3)$$



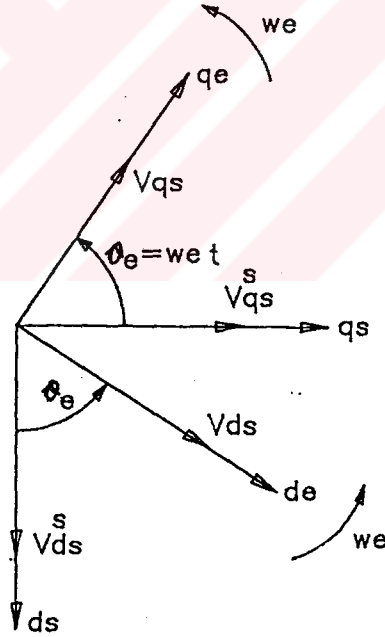
Şekil 2.1. Durağan as-bs-cs eksenlerinden d^s - q^s eksenlerine geçiş.

Durağan koordinat sisteminde yazılmış gerilimler Şekil 2.3'deki gibi d^e-q^e senkron hızda dönen koordinat sistemine çevrilebilir.

$$\begin{aligned} V_{qs} &= V_{qs}^s \cos \omega_e t - V_{ds}^s \sin \omega_e t \\ V_{ds} &= V_{qs}^s \sin \omega_e t + V_{ds}^s \cos \omega_e t \end{aligned} \quad (2.4)$$

(2.4) bağıntılarından yola çıkılarak duran değişkenleri dönen değişkenler cinsinden şöyle yazılabilir.

$$\begin{aligned} V_{qs}^s &= V_{qs} \cos \omega_e t + V_{ds} \sin \omega_e t \\ V_{ds}^s &= -V_{qs} \sin \omega_e t + V_{ds} \cos \omega_e t \end{aligned} \quad (2.5)$$



Şekil 2.2. Durağan d^s-q^s eksenlerinden dönen d^e-q^e eksenlerine geçiş.

Faz gerilimlerinin dengeli ve sinüsoidal olduğunu kabul edelim. O zaman,

$$\begin{aligned} V_{as} &= V_{sm} \cos \omega_e t \\ V_{bs} &= V_{sm} \cos(\omega_e t - 120^\circ) \\ V_{cs} &= V_{sm} \cos(\omega_e t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.6)$$

bunları (2.3) de yerine koyarsak

$$\begin{aligned} V_{qs}^s &= V_{sm} \cos \omega_e t \\ V_{ds}^s &= -V_{sm} \sin \omega_e t \end{aligned} \quad (2.7)$$

Bu bağıntıları tekrar (2.4) de yerine yazarsak

$$\begin{aligned} V_{qs} &= V_{sm} = V_m \\ V_{ds} &= 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Bu bağıntılar göstermektedir ki sinüsoidal değişkenler, dönen sistemde d.a. büyüklükler olarak görünür.

2.1.2. Senkron Hızda Dönen Referans Sistemi

a_s , b_s , c_s durağan koordinatlarda makinanın üç faz stator eşitlikleri yazmak mümkündür. Stator eşitlikleri vektör formda şöyle yazılabilir.

$$\bar{V}_s^s = R_s \bar{i}_s^s + \frac{d\bar{\psi}_s^s}{dt} \quad (2.9)$$

Burada $\bar{V}_s^s$, $\bar{i}_s^s$ ve $\bar{\psi}_s^s$ sırasıyla durağan koordinatlarda gerilim, akım ve akı ani değer vektörleridir.

Her vektör birim vektör bileşenleri formunda yazılabilir.

$$\bar{X}_s = X_{as} \bar{U}_{as} + X_{bs} \bar{U}_{bs} + X_{cs} \bar{U}_{cs} \quad (2.10)$$

Eğer eksenler $\bar{\omega}_e$ senkron hızında dönüyorsa (2.9) eşitliği şu formda yazılabilir.

$$\bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + \bar{\omega}_e \cdot \bar{\psi}_s \quad (2.11)$$

Burada (2.9) daki bağıntıya $\bar{\omega}_e \cdot \bar{\psi}_s$ terimi eklenmiştir. Bu terim, koordinat sistemin dönmesinden dolayı oluştuğu için hız gerilimi olarak adlandırılır.

(2.11) eşitliğini oluşturduktan sonra dönen koordinatlardan d-q gerilim bileşenleri yazılabilir.

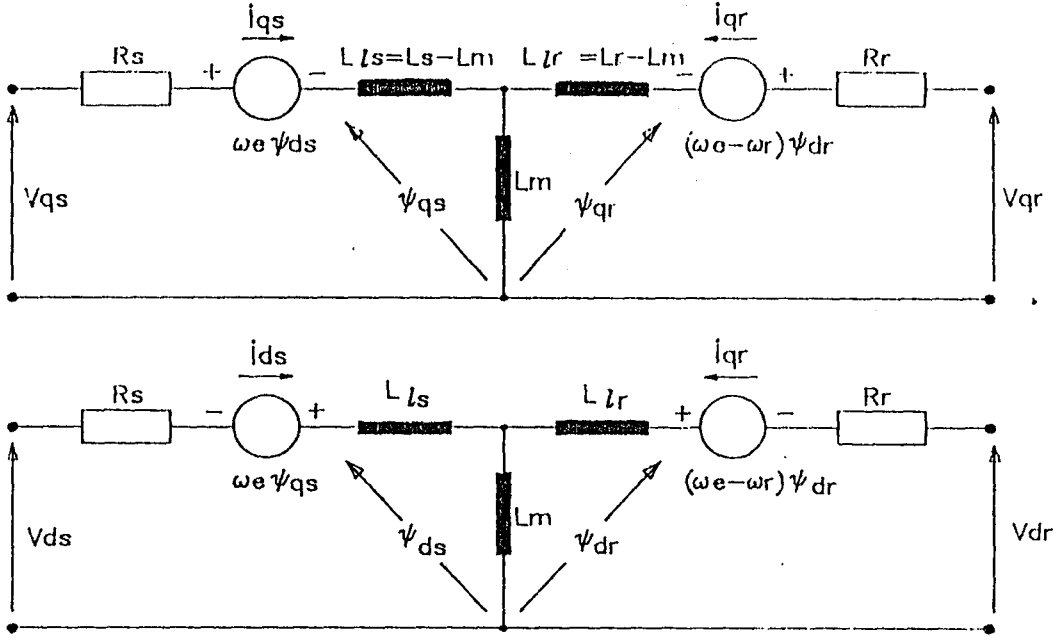
$$\begin{aligned} V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_e \psi_{ds} \\ V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_e \psi_{qs} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$\omega_e=0$ alınırse sabit d^s-q^s koordinatlarda yazılmış statör eşitlikleri elde edilir. Eğer rotor hareket etmiyorsa rotor eşitlikleri (2.12) bağıntıları gibi olur.

$$\begin{aligned} V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_e \psi_{dr} \\ V_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_e \psi_{qr} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Burada bütün değişkenler statora indirgenmiştir. Eğer rotor ω_r hızında dönüyorsa, rotorda sabit düşünülen d-q eksenleri senkron hızda dönen referans sistemine göre $(\omega_e - \omega_r)$ hızında dönmüş olur. Böylece (2.13) eşitlikleri aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \\ V_{dr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \end{aligned} \quad (2.14)$$



Şekil 2.3. Dönen koordinat sisteminde d-q eşdeğer devreler.

Şekil 2.3. dönen eksen sisteminde makina dq eşdeğer devresi göstermektedir. Akımlar cinsinden akı bağıntıları şöyle yazılabilir.

$$\psi_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr})$$

$$\psi_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr})$$

$$\psi_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr})$$

$$\psi_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr})$$

(2.15)

Bu bağıntıları (2.12) ve (2.14) bağıntıları ile birleştirerek, makinanın elektrik yanına ait dinamik modeli, gerilim ve akımlar cinsinden matris formunda şöyle yazılabilir [2].

$$\begin{vmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_s + PL_s & \omega_e L_s & PL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + PL_s & -\omega_e L_m & PL_m \\ PL_m & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + PL_r & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & PL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + PL_r \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{vmatrix} \quad (2.16)$$

$P, d/dt$ operatörüdür. Tek taraflı beslenen bir makina için V_{qr} ve V_{dr} sıfırdır. Eğer ω_r 'nin sabit olduğu düşünülürse o zaman giriş gerilimler V_{qs} ve V_{ds} ve ω_e biliniyorsa i_{qs} , i_{ds} , i_{qr} ve i_{dr} akımları (2.16) bağıntılarından elde edilebilir. Makinanın bir dönüştürücü ile beslenmesinde olduğu gibi V_{qs} ve V_{ds} gerilimlerinin dalga şekli, sinüsden farklı olabilir. Akım beslemeli bir makina için i_{qs} , i_{ds} ve ω_e bağımsız büyüklüklerdir. Bağımlı değişkenler V_{qs} , V_{ds} , i_{qr} ve i_{dr} (2.11) eşitlikleri çözülerek elde edilir. Eğer (2.16) bağıntılarının sürekli hal için çözümü istenirse P 'li terimler sıfır olur. Sürekli halde senkron hızda dönen sistem değişkenleri sinüsoidal beslemede daha önce söylediğimiz gibi d.a. büyüklükler olarak görünürler.

Gerçekte (2.16) bağıntılarında görülen ω_r sabit olarak alınamaz, momente bağımlı olarak değişir.

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.17)$$

T_L yük momentidir, J sistem eylemsiz momentidir.

ω_r : rotor elektriksel hızı (rad/s)

$\omega_m = \frac{2\omega_r}{P}$ rotor mekanik hızı (rad/s)

2.1.3. Üretilen Moment

Hava aralığı akısı ile rotor mmf'nin kesişmesi sonucu oluşan moment genel olarak vektörel formda şöyle yazılabilir [2].

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \bar{\psi}_m \bar{x} \bar{I}_r \quad (2.18)$$

d-q bileşenler cinsinden

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\psi_{dm} i_{qr} - \psi_{qm} i_{dr}) \quad (2.19)$$

Akı ve akımlar arasındaki ilişkileri hesaba kata-
rak değişik şekillerde şöyle yazılır,

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\psi_{dm} i_{qs} - \psi_{qm} i_{ds})$$

$$\frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (2.20)$$

$$\frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})$$

(2.16), (2.17) ve (2.20) bağıntıları asenkron ma-
kinanın dinamik elektro mekanik modelini verir.

2.1.4. Durağan Referans Sistemi

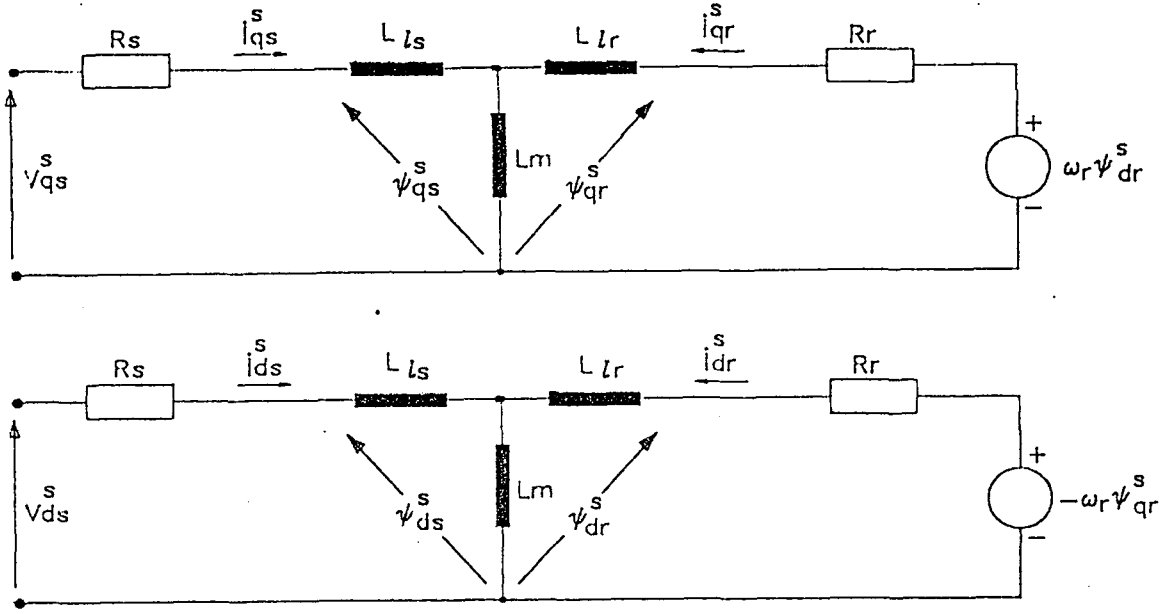
Dinamik makina modeli $\omega_e = 0$ alınarak sabit referans
modeli (2.16) bağıntısından elde edilir. Bunu gösteren eş-
değer devre 2.4'de gösterilmiştir.

Durağan koordinat sisteminde değişkenler sinüsoi-
dal beslemede sürekli halde sinüs biçimli olarak görünür-
ler.

(2.18), (2.19) ve (2.20) deki moment bağıntıları,
durağan koordinat değişkenleri cinsinden geçerli bağıntı-
lardır.

2.2. Asenkron Makina Kontrolünün Karakteristikleri

Asenkron makina kontrol sistemleri temel olarak
çok değişkenli kontrol sistemleridir. Bu sistemlerde ge-
rilim ve frekans giriş işaretleri, hız, konum, moment,
hava aralığı akısı, stator akımı veya bunların herhangi



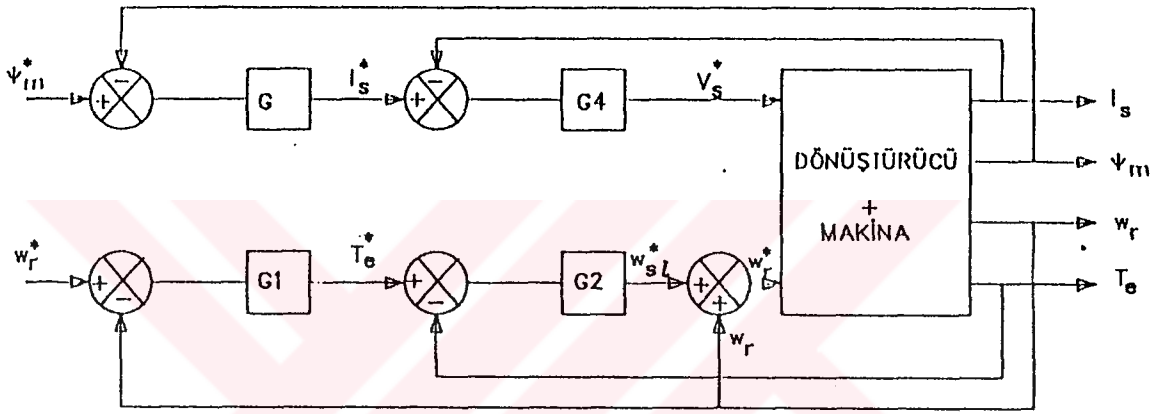
Şekil 2.4. Durağan eksen sisteminde d-q eşdeğer devreler.

bir bileşiminden oluşan çıkış işaretleri olabilir. Makina modelinin lineer olmaması ve makina parametrelerinin doyuma, sıcaklık ve deri etkisiyle değişmesinin bu nonlineerliği artırması, makinanın kontrolünü güçleştirmektedir.

Çeviricilerin örnekleme karakteristiklerinden dolayı sistem aynı zamanda ayrık zamanlı bir sistemdir. Ayrıca kontrol devresinde mikro işlemci ve sayısal devrelerin kullanılması durumunda ek bir örnekleme karakteristiği doğar. Bu çeviricilerin ve kontrolörün ayrık zaman etkileri, eğer makinanın zaman sabiti uzunsa-ki normalde böyledir-ihmal edilirler.

Aşağıdaki şekilde kontrol sisteminin genel diyagramı gösterilmektedir. Burada stator akımı, hava aralığı

akısı, hız ve moment çıkış olarak düşünülmüştür ve giriş kontrol sinyalleri, hava aralığı akısı ve hız olarak düşünülmüştür. Bütün çıkış ve kontrol çevrim işaretleri doğru gerilimdir ve değişkenlere orantılıdır.



Şekil 2.5. Asenkron makinanın genel kontrol blok diyagramı.

Örneğin, hava aralığı akısı kontrol çevrimi, iç çevrimde stator akımını kontrol ederek dolayısıyla stator gerilimini kontrol eder. Benzer olarak hız çevriminde, iç çevrimde moment kontrol edilir. Moment çevrimi kayma sinyalini (ω_{sl}) üretir. Bu da, geri besleme hızı ω_r ye eklenerek frekans sinyali üretilir. Kontrolör elemanları G_1 , G_2 , G_3 ve G_4 basit kazanç veya kompensatör fonksiyonu ve bir sınırlayıcı içerirler. Bu sınırlayıcı sayesinde değişkenlerin belli sınırlar içerisinde kalması sağlanır. Aynı zamanda iç çevrimlerin, dış çevrimlere göre daha kısa zaman sabitlerine sahip olmaları gerekir. A.A. kontrol

sistemlerinin bazı çıkış işaretlerin algılayıcı yardımı ile ölçülmesi zordur. Bunun için bu işaretler orantısal gözleyiciler sayesinde tahmini değerler kullanılabilir.

Çıkış işaretlerinin sayısı, eğer iç çevrimlerin sayısı azaltılabilirse düşürülmüş olur. Fakat, bu, sistem davranışının zayıflamasına neden olabilir.

A.A. sistemlerin çok değişkenli, lineer olmayan ve ayrık zamanlı olmaları, bunların kararlılık analizlerinin yapılmasını zor kılar. Bu iş için computer simülasyon veya computer yardımcı analizler çok kullanışlı olmaktadır.

2.3. Skalar Kontrol Yöntemleri

Bu bölümde, skalar kontrol yöntemlerinden olan, gerilim beslemeli evirici ve akım beslemeli evirici kontrollerini anlatacağız. Skalar kontrol tekniği, bir değişkenin sadece büyüklüğünü kontrol etmektir. Referans değerler ve geri besleme işaretleri, değişkenle orantılı değişen d.a. büyüklüklerdir. Buna karşın vektörel kontrolde bir değişkenin hem büyüklüğü hem de fazı kontrol edilir.

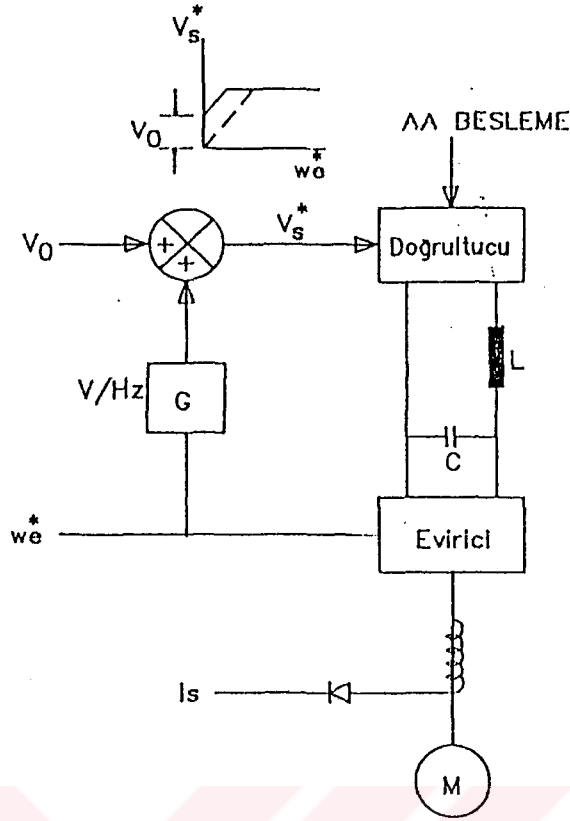
2.3.1. Gerilim Kaynaklı Evirici Kontrolü

2.3.1.1. Gerilim/Frekans Kontrolü

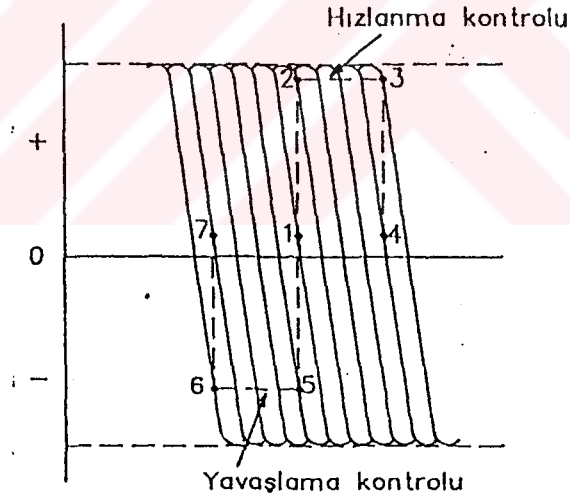
Asenkron motorlar için basit ve yaygın bir açık çevrim gerilim/frekans kontrol yöntemi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

Güç devresi, faz kontrolü tek ya da üç faz beslemeli bir doğrultucu, LC filtre ve 6 darbeli bir eviriciden oluşmaktadır.

ω_e frekansı, küçük frekans kaymaları ihmal edilirse, motor hızına yaklaşık olan bir işaret değişkenidir. Bu şemaya gerilim/frekans kontrol şeması denmesinin nedeni, doğrultucu gerilim işareti, V_s direkt olarak Volt/Hertz



(a)



(b)

Şekil 2.6. a) Açık çevrim "gerilim/frekans" kontrolü
b) Hızlanma ve yavaşlama karakteristiği.

kazanç sabiti G üzerinden frekans işaretinden üretilmektedir. Sürekli halde çalışmada, makinanın hava aralığı akısı ψ_m yaklaşık olarak V_s/ω_e oranına bağlıdır. Bu nedenle

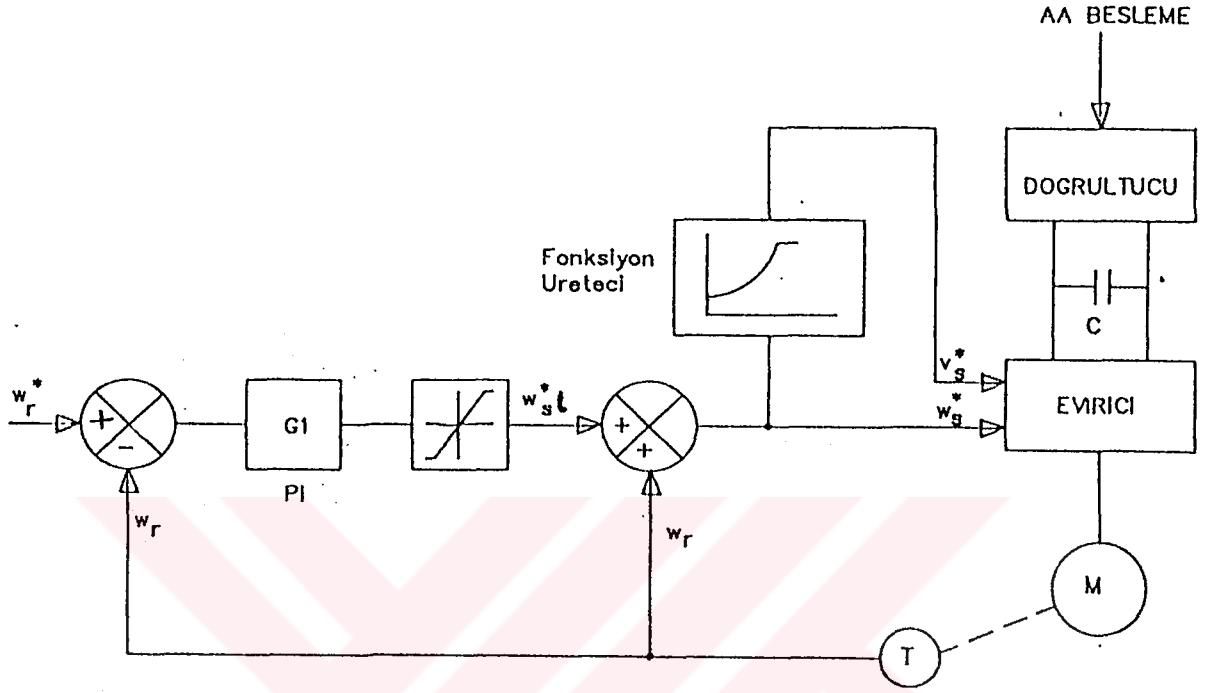
nominal hava aralığı akısını devam ettirmek, dc makinada-
kine benzer olarak stator akımı ile maksimum moment ara-
sındaki hassasiyeti sağlayacaktır. Sıfır hız yakınlarında
frekans sıfıra yaklaştığında, stator gerilimi sıfıra ya-
kın bir değer alır ve bu durumda gerilim, stator direnci
tarafından absorbe edilir. Bu yüzden yardımcı bir V_0 geri-
limi stator direnç etkisini gidermek için uygulanır. Böy-
lece sıfır hıza kadar nominal hava aralığı akısı ve maks-
imum moment elde edilebilir. Kararlı çalışmada eğer yük mo-
menti artırılırsa, kararlılık sınırları içerisinde kayma
da artacaktır ve motor momenti ile yük momenti arasındaki
denge sürecektir.

Eğer, referans frekans, makina frekansını aşarsa,
doğrultucu gerilimi doyma bölgesine girer ve makina sabit
moment bölgesinden alan zayıflama (sabit güç) bölgesine
geçer. Bu bölgede, hava aralığı akısı ψ_m azalacaktır ve
bundan dolayı makina momenti, aynı stator akım değerleri
için daha az değerlerde olacaktır. Açık çevrim gerilim
kontrolü ile, hat gerilimindeki dalgalanma ve empedans
azalması, hava aralığı akısında dalgalanmaya neden olacak-
tır. Bu dalgalanma, doğrultucunun kapalı çevrim gerilim
kontrolü yapılarak önlenabilir. Sürücü sistemin hızlanma/
yavaşlama performans karakteristiği, sabit moment bölgesi
için Şekil 2.6(b)'de gösterilmiştir.

Kararlı çalışma süresince (1 noktası) eğer frekans
komutu ω_e bir adım artırılırsa, kayma devrilme momentini
aşar ve makina kararsız hale gelir. Buna benzer olarak
frekans eğer azaltılırsa kararsızlık yine olur. Bu yüzden,
hızlanma ve yavaşlama durumlarında, frekans hızı takip et-
meli ki, kayma devrilme noktasını aşmasın. Bahsedilen hız-
lanma/yavaşlama da kararlı çalışma Şekil 2.6(b)'de göste-
rildiği gibi ayarlanabilir. Akım sınır kontrolü ile sağla-
nabilir. Pozitif bir frekans artışı için, şekilde görüldü-
ğü gibi kayma artar ve stator akım I_s sınır değerine ula-
şır. Çalışma noktası hız moment eğrileri üzerinde 1

noktasından 2 noktasına geçer. Bundan sonra frekans, akım sınırı kontrol edilerek, sabit moment hızlanma bölgesinde 2'den 3'e kadar artırılır. 3 noktası ile 4 noktası arasında, akım sınır değerinin altına düşer ve kayma frekansındaki azalma ile sistem, kararlı çalışma noktası 4'e gelir. Negatif yönde bir frekans komutu için Şekil 2.6(b)'de gösterilen 1-5-6-7 noktaları izlenerek yavaşlama sağlanır. Yavaşlama sırasında, stator frekansı hızın altına düşer ve makinanın enerjisi, elektrik enerjisi olarak ara devreye verilerek ara devre gerilimini yükseltir. Tek kutuplu bir doğrultucu ile çalışmada bu enerji dinamik frenleme direncinde periyodik olarak çalışan bir anahtar vasıtasıyla absorbe edilir. Böylece, ara devre gerilimi kontrol edilir. Bu şemada hız yük momentindeki değişimler ve gerilimdeki dalgalanmalara göre değişmesi sağlanır. Eğer açık-çevrim hız dalgalanması makul seviyede değil ise Şekil 2.7'deki gibi bir kapalı-çevrim hız kontrolü yapılabilir. Şekilde kayma regülasyonlu gerilim/frekans kontrol şeması görülmektedir. Bu şemada, kayma işareti olan ω_{st} hız çevriminin hatasından (PI) oransal-integral kontrolör ve bir sınırlayıcı üzerinden üretilmektedir. Kayma hız işaretine eklenerek frekans işareti üretilir. Frekans işaretinden aynı zamanda bir Volt/Hertz fonksiyon generatörü yardımı ile gerilim işareti üretilir. Bu fonksiyon generatörü aynı zamanda düşük frekanslarda stator düşümlerini kompanse eder. Kayma, momentle orantılı olduğu için bu devre hız kontrol çevrimi içersinde moment kontroluolarak düşünülebilir. Önceki şemada farkı, o devrede moment sınır kontrolu endirekt olarak akım sınırı kontroluyla sağlanıyordu. Bu devrede, moment kontroluna ek olarak pahalı akım algılayıcı kullanılmamıştır ve aynı hız işareti, her iki çevrimde kullanılmıştır. Pozitif yönde bir hız işareti ile makina, maksimum moment tarafından belirlenen bir kayma sınırında hızlanır. Sonra, yük momentinin belirlediği bir kararlı çalışma noktasına, kayma değeri düşürülerek gelinir. Eğer, hız işareti ω_r azaltılırsa, kayma negatif olur ve makina dinamik ya da

yararlı frenleme modunda çalışmaya başlar.



Şekil 2.7. Kayma regülasyonlu sabit gerilim/frekans oranlı hız kontrolü.

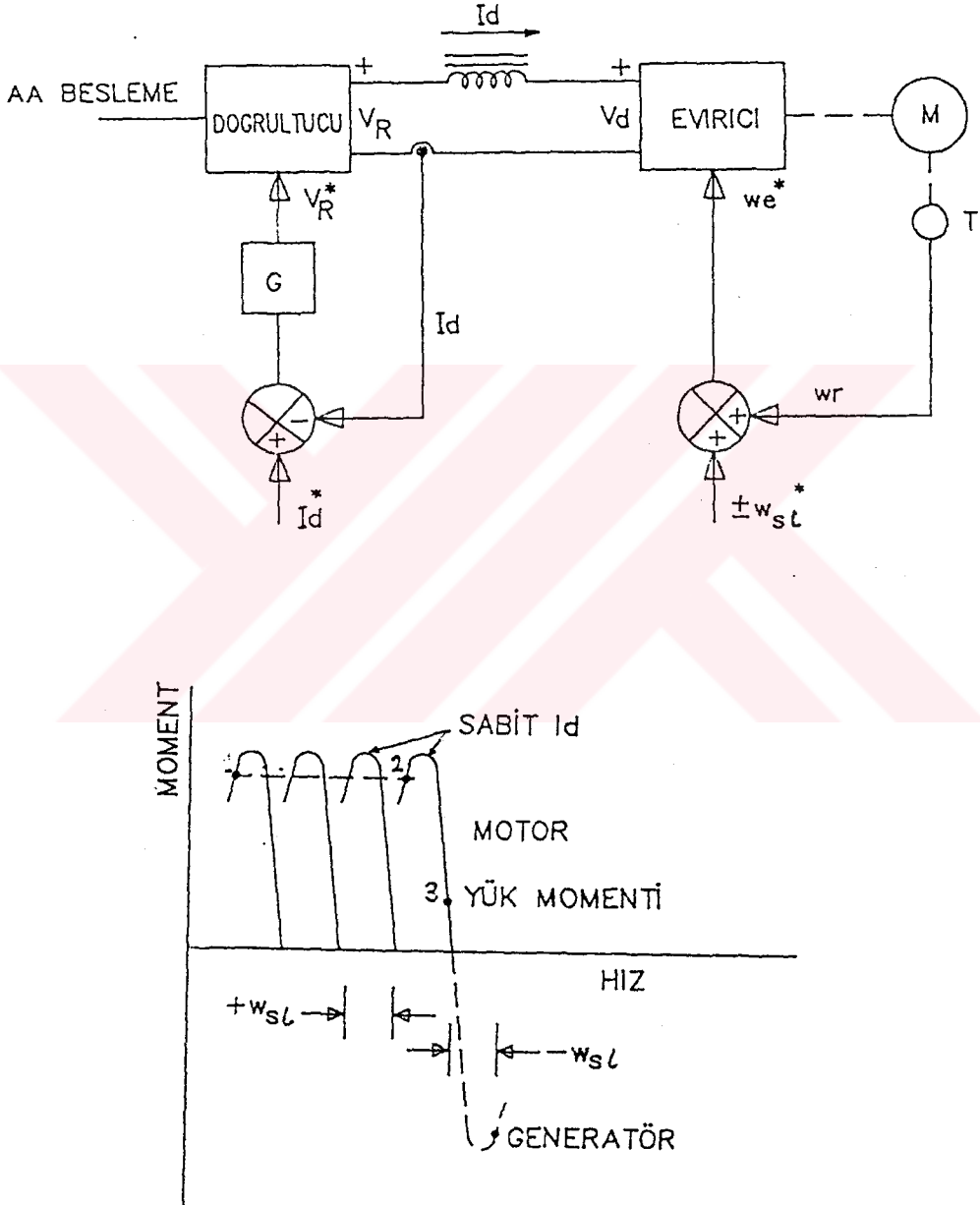
2.3.2. Akım Kaynaklı Evirici Kontrolü

Yukarıda bahsedilen gerilim kaynaklı eviricilerin bazı kontrol prensipleri, akım kaynaklılar için de geçerlidir. Daha önce de belirtildiği gibi akım kontrollu gerilim kaynaklı eviriciler, akım kaynaklı eviricilerin kontrol karakteristiklerine sahiptirler [2].

2.3.2.1. Bağımsız Akım ve Kayma Kontrolü

Bir akım kaynaklı eviricili sürücüde, doğrultucu ateşleme açıları değiştirerek, akımın değiştirilebileceği

yerlerde dq ara devre akımı ve evirici frekansı kontrol parametreleridir. Yalnız, akım kaynaklı eviriciler, gerilim kaynaklı eviriciler gibi açık çevrimle kontrol edilemezler [2].



Şekil 2.8. a) Bağımsız akım ve kayma kontrolü,
b) Sabit dq akımda moment-kayma karakteristiği.

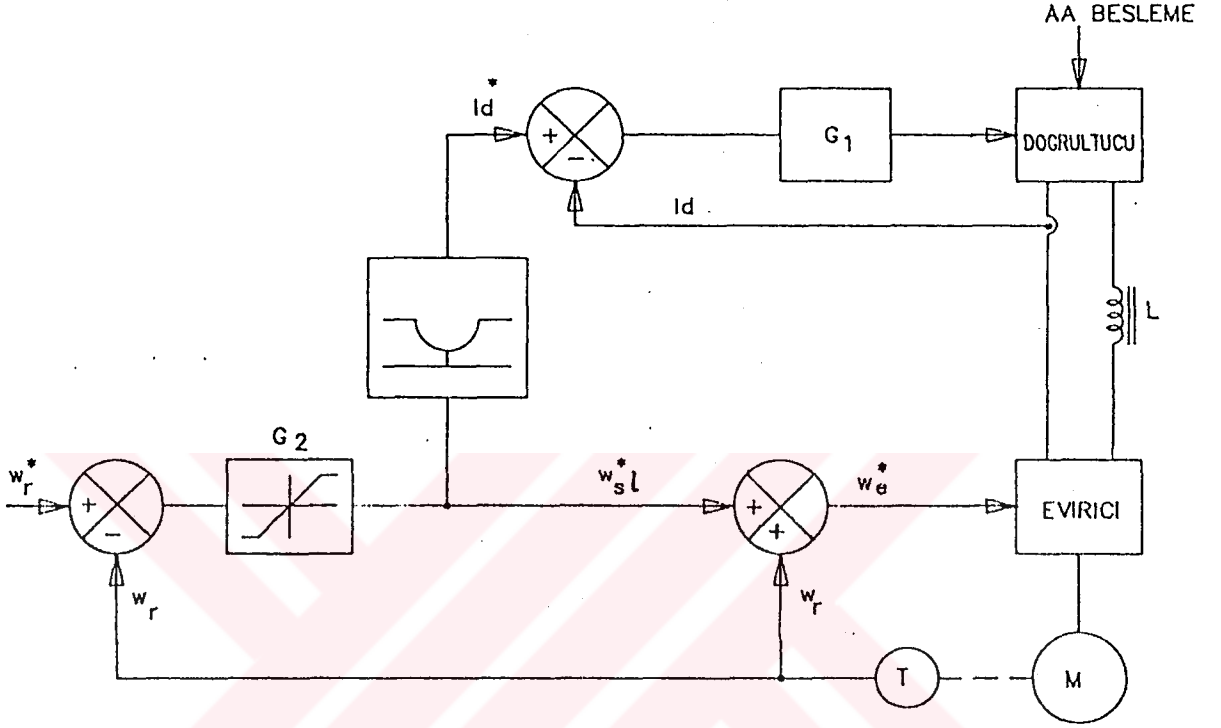
Akım ve kaymanın bağımsız kontrol edildiği en basit kapalı çevrim kontrolü, Şekil 2.8(a)'da ve davranış karakteristikleri (b)'de gösterilmiştir. DA. ara devre akımı I_d doğrultucu çıkış gerilimi V_R yi kontrol eden bir geri besleme çevrimi ile kontrol edilir ve kayma referans değeri ile hız işareti toplanarak frekans işareti üretilir. Makina V_R ve V_d gerilim polariteleri ters döndürüldüğü zaman, negatif bir frekans işareti ile generatör modunda çalıştırılır ve enerji makinadan kaynağa doğru akar. Sistemin bir dezavantajı, makinanın hava aralığı akısı kontrol edilemez. Sistemde moment kontrolü ya da ara devre akımı I_d , ya da kayma kontrol edilerek sağlanır.

Makinanın sabit akım ve sabit kayma koşulları altında sabit momentle 1 noktasından 2 noktasına hızlanması Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Çalışma noktası, moment-hız eğrisinin kararsızlık bölgesinde kasıtlı olarak tutularak, hava aralığı akısı, doyma bölgesinin altında tutulur. Sürekli çalışma koşullarında eğer makina momenti ile yük momentinin dengelenmesi için kayma azaltılarak 3 noktasına gelinirse akı doymasına neden olur. Diğer yandan, eğer I_d akımı, sabit kayma altında yük momentini dengelemek için azaltılırsa, makina zayıf akıda çalışacaktır. Bu problemlerden dolayı bu kontrol devresi pratikte pek kullanılmaz [2].

2.3.2.2. Programlanabilir Akım Kontrolü ve Sabit Akıllı Çalışma

Akım kaynaklı evirici kullanılan, pratik ve çok daha geliştirilmiş bir hız kontrol devresi Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Bu devrede akının sabit olmasını sağlamak için, akım işareti olan I_d , ω_{sl} kaymasının bir fonksiyonu olarak üretilir. Daha önce belirtildiği gibi nominal hava aralığı akısının sabit olarak tutulması, kontrol sisteminde daha iyi bir kararlılık ve daha hızlı bir geçici hal cevabı sağlar. Sıfır kaymada üretilen moment sıfırdır fakat I_d akımı makinanın mıknatıslanma akımını

karşılayan minimum bir değere sahiptir.

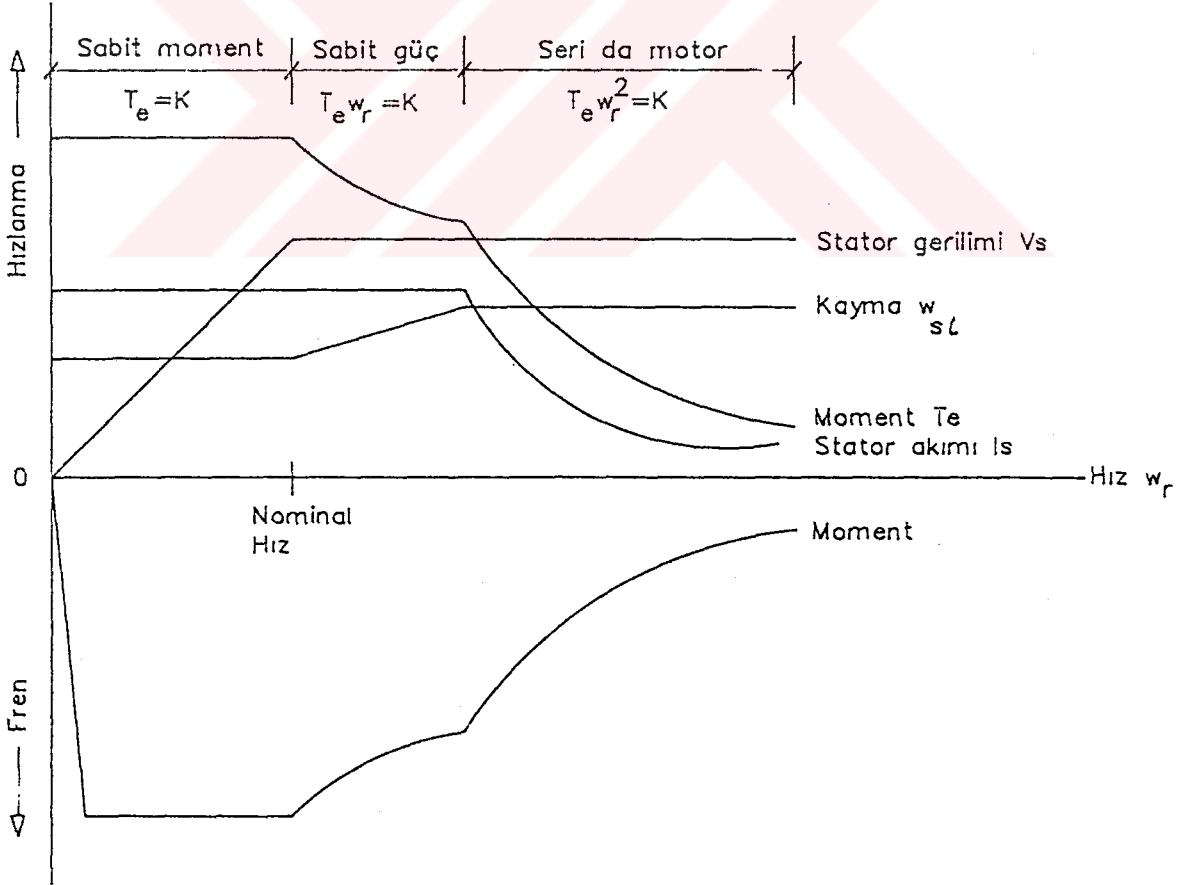


Şekil 2.9. Sabit akıllı çalışma için programlanabilir akım kontrolü.

Kayma artırılırken I_d akımı da aynı zamanda artırılır ki gerilim/frekans oranı sabit kalsın. Negatif kayma değerlerinde I_d - w_{sl} ilişkisi, birinci bölgedekinin simetridir ve kontrol sistemi her dört bölgede yeterli bir performansla çalıştırılabilir. Fonksiyon üretici devrenin çıkışı her çeşit makina için doğru olarak oluşturulabilir. Parametrelerdeki değişimler ihmal edilirse, makina sürekli çalışmada, sabit hava aralığı akısına sahip bir d.a makina gibi davranır. Kaymanın direkt olarak hız kontrol çevriminden kontrol edilmesi yerine, hız çevrim hata işareti I_d akımı ile kontrol edilebilir ve w_{sl} kayma işareti I_d akımının fonksiyonu olarak üretilebilir.

Bu devrede generatör çalışma için, hız çevrimi hata işareti negatif olduğu zaman, kayma işaretinin polaritesi de ters döndürülebilir. Bu kontrol prensipleri, aynı zamanda, gerilim kaynaklı eviricilere de uygulanabilir.

Daha hassas bir hava aralığı akısı kontrolu için bağımsız bir akı kontrol çevrimi oluşturulabilir. Bilinmelidir ki akı doğrudan ya da dolaylı olarak akım kontrol çevrimi ile kontrol edildiğinde, tam gerilimde doğrultucu doy maya girerse, kontrol kaybedilir. Bu durumda sistem, kayma kontrolu altında, zayıf alan bölgesinde, gerilim kaynaklı evirici olarak çalışmaya devam eder. Akı referans işareti, hıza ters olarak düşürülebilir. Böylece akım kontrol çevrimi, zayıf alan bölgesinde de etkin olur.



Şekil 2.10. Hızlanma ve fren modunda sistem karakteristikleri.

2.4. Vektör Kontrol Yöntemi

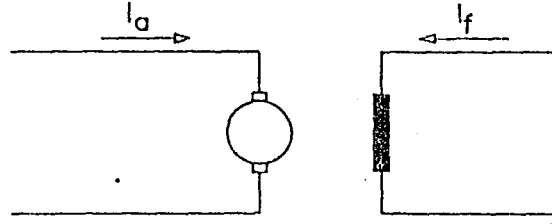
Buraya kadar anlatılan gerilim kaynaklı veya akım kaynaklı eviricilerin skalar kontrolunda, gerilim ya da akım ve frekans, asenkron makinanın temel kontrol değişkenleridir.

Örneğin, bir gerilim kaynaklı eviricide, moment ve hava aralığı akısı gerilim ve frekansın fonksiyonudurlar. Bu ikili etki, makinanın cevabının yavaş olmasına neden olurlar. Örneğin, moment, kayma artırılarak artırılırsa, akı azaltılır. Fakat bu etki, ek bir gerilim beslemesi yapılan akı kontrol çevrimi ile giderilir. Bu geçici akı azaltması, momentin kayma ile olan hassasiyetini azaltarak, makinanın cevap süresini uzatır. Bu açıklamalar, akım kaynaklı evirici için de geçerlidir.

Bu sınırlama vektörel ya da alana yönelik kontrol metodları uygulanarak kaldırılır. Bu kontrol metodları hem asenkron hem de senkron makinalara uygulanabilir. Vektörel kontrolde a.a makina, serbest uyarmalı bir d.a makina gibi kontrol edilir. Bir d.a. makinada doyma ve diğer etkiler ihmal edilirse moment aşağıdaki gibi olur [2].

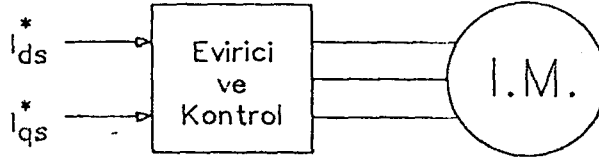
$$T_e = K_e I_a I_f \quad (2.21)$$

I_a , akımın armatür ya da moment bileşeni, I_f ise akımın akı bileşenidir. Bir d.a. makinada kontrol değişkenleri I_a ve I_f ortagonal (dik) vektörler olarak düşünülebilir. Normal çalışmada, uyarma akımı I_f nominal akıyı sağlamak için sabit tutulur ve momentin değiştirilmesi için armatür akımı değiştirilir. I_f akımı veya alan akısı armatür akımı I_a dan ayrılmış olduğu için moment hassasiyeti geçici ve sürekli hallerden her ikisinde de maksimum olur. Bu kontrol modu asenkron motora, makina çalışması; değişkenlerin d.a. büyüklükler olarak görüldüğü döner koordinatlarda, düşünüldüğü zaman uygulanabilir.



$$T_e = K_e \psi_g I_a = K'_e I_a I_f$$

I_a : moment bileşeni
 I_f : alan bileşeni



$$T_e = K_e |\hat{\psi}_m| I_{qs} = K'_e I_{qs} I_{ds}$$

I_{qs} : moment bileşeni
 I_{ds} : alan bileşeni

Şekil 2.11. Vektör kontrolde asenkron motorun D.A. motoruna benzerliği

Şekil 2.11'de evirici ve kontrol devreli bir asenkron motor ve iki kontrol girişi i_{ds} ve i_{qs} gösterilmiştir. i_{ds} ve i_{qs} akımları sırasıyla statör akımının döner koordinatlardaki d eksen ve q eksen bileşenleridir. Vektör kontrolde i_{ds} d.a makinada I_f akımına, i_{qs} ise I_a akımına karşılık düşer. Böylece moment;

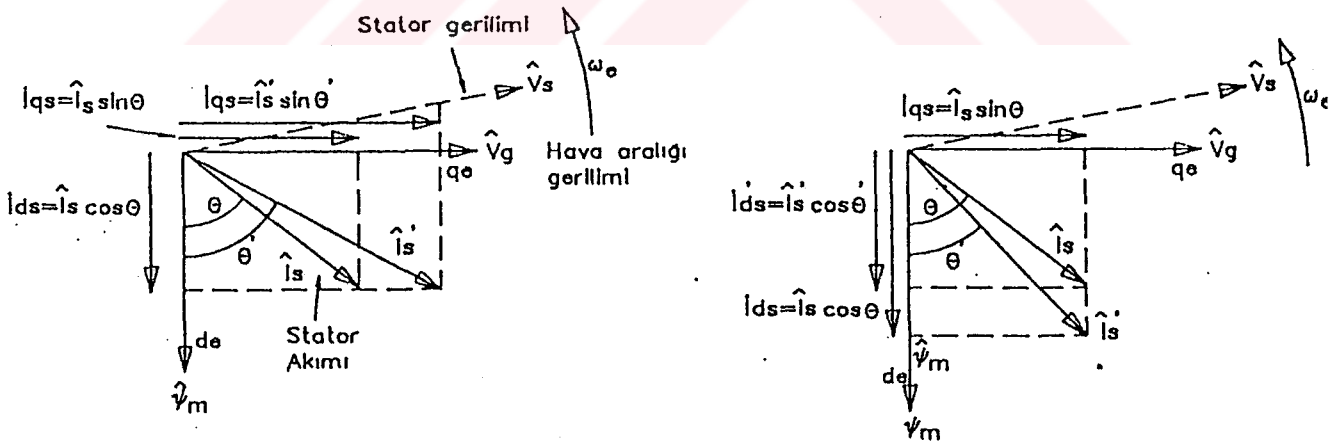
$$T_e = K_e \cdot |\psi_m| \cdot i_{qs} = K_e \cdot i_{qs} \cdot i_{ds} \quad (2.22)$$

olarak yazılabilir [2].

i_{ds} ve i_{qs} vektörlerinin, nasıl kontrol vektörleri kabul edileceği Şekil 2.12'de senkron hızla dönen d^e-q^e eksenleri yardımıyla anlatılmıştır. Kolaylık olsun diye

rotor kaçak akısı ihmal edilir. Fazör diyagramı hava aralığı gerilimi $\bar{V}_g$ q^e ekseninde düşünülerek çizilir. Stator akımları $i_{qs} = \bar{I}_s \sin \theta$ $\bar{V}_g$ fazında ve $i_{ds} = \bar{I}_s \cos \theta$ $\bar{V}_g$ ye diktir. i_{qs} akımı stator akımının aktif ya da moment bileşenidir ve hava aralığı aktif gücü $\bar{V}_g \cdot i_{qs}$ dir. i_{ds} akımı ise stator akımının alan ya da reaktif bileşenidir. Hava aralığı akısı ψ_m yi oluşturur. Hava aralığı reaktif gücü $\bar{V}_g \cdot i_{ds}$ dir [2].

Fazör diyagramından hava aralığında üretilen moment $T_e = K_e |\psi_m| i_{qs} = K_e i_{qs} i_{ds}$ 'dir [2]. i_{qs} ve i_{ds} değişkenleri birbirini etkilemeden bağımsız olarak değiştirilebilirler. Normal çalışmada bir d.a. makinada olduğu gibi i_{ds} akımı sabit tutularak i_{qs} değiştirilerek moment değiştirilir. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi $\bar{I}'_s$ akımı, $\bar{I}_s$ akımına göre kutupsal olarak kaymıştır.



Moment bileşeninin artırılması

Alan bileşeninin artırılması

Şekil 2.12. Direkt vektörel kontrolde fazör diyagramı (Tepe değer terimleri ile)

Makina modeli ile vektörel kontrolün gerçekleştirilmesinin temelleri Şekil 2.13 yardımı ile açıklanabilir. Şekilde evirici çıkarılmıştır ve faz akımları i_a , i_b ve i_c 'nin ideal olarak üretildiği varsayılmıştır. Faz akımları i_a , i_b ve i_c , i_q^s ve i_d^s bileşenlere dönüştürülür. Bunlar daha sonra makina modeline uygulanmadan önce $\cos\omega_e t$ ve $\sin\omega_e t$ birim vektörleri yardımı ile senkron hızda dönen bileşenlere dönüştürülür. Kontrolör ters dönüşüm ve dönüşüm yaparak i_{ds} ve i_{qs} parametrelerini makina değişkenleri i_{ds} ve i_{qs} 'ye çevirir. Birim vektörler i_{ds} ψ_m fazörü ile i_{qs} nin de $\bar{V}_g$ fazörü ile arasındaki ilişkiyi belirler. Dönüşüm ve ters dönüşüm dinamik olarak çalışmaz. Bu yüzden, i_{ds} ve i_{qs} 'deki değişimlere ani olarak cevap verir.

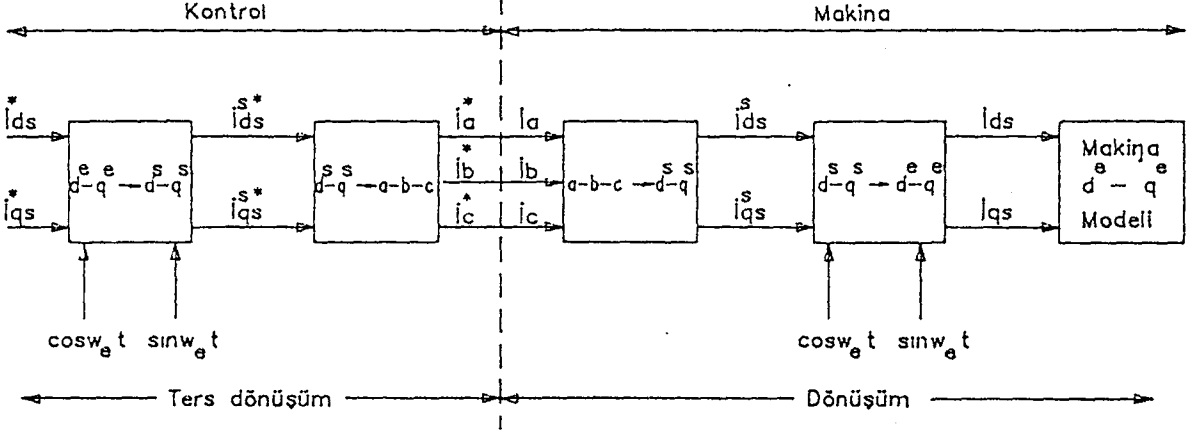
Ayrılmış kontrolün sağladığı hızlı cevap verme özelliğine ek olarak asenkron makinada moment devrilme noktasını geçerken meydana gelen geçici kararsızlık problemi ortaya çıkmaz.

Kontrol, dört bölgede çalışma yapılacak şekilde kolaylıkla düzenlenebilir. Bu yüzden, vektör kontrolü yapılmış asenkron makinalar yüksek performans gerektiren, şimdiye kadar da makinanın kullanıldığı yerlerde kullanılabilir.

Başlıca iki vektör kontrol yöntemi vardır. Direkt vektör kontrol ve dolaylı vektör kontrol. Bu yöntemler, birim vektörler $\cos\omega_e t$ ve $\sin\omega_e t$ 'nin nasıl üretildiği ile ilgilidir.

2.4.1. Doğrudan Vektör Kontrol

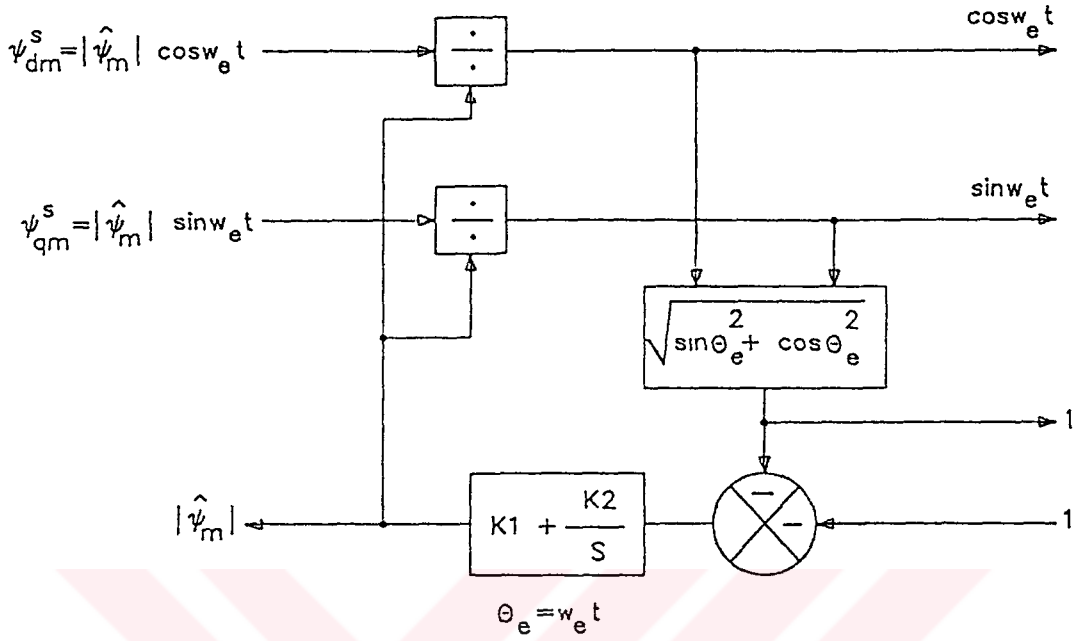
Bir akım kontrollü PWM evirici için temel vektör kontrol diyagramı Şekil 2.14'de gösterildiği gibidir. DA büyüklükler olan i_{ds} ve i_{qs} kontrol parametreleri akı işaretlerinden üretilen $\cos\omega_e t$ ve $\sin\omega_e t$ birim vektörleri yardımı ile durağan koordinatlardaki i_{ds}^s ve i_{qs}^s büyüklüklerine dönüştürülür.



Şekil 2.13. Vektör kontrolün makina modeli ile gerçekleştirilmesi

Bu büyüklükler daha sonra evirici için faz akımları işaretlerine dönüştürülür. Akı kontrolünün daha hassas olması için akı kontrol çevrimi eklenmiştir. i_{qs} akım işareti, moment kontrol çevriminden üretilmiştir. Eğer istenirse bu çevrimden yararlanılarak hız kontrolu da yapılabilir. Negatif momentlerde i_{qs} akımı negatif olur. Şekil 2.12'ye göre i_{qs} akımı ters döndürülmüş olur.

Vektör kontrol metodu, hava aralığı akısından birim vektör işaretlerinin üretilmesine bağlıdır. Hava aralığı akıları ψ_{dm}^s ve ψ_{qm}^s direk olarak ölçülebilir ya da stator akım ve gerilimden tahmin edilebilir. i_{ds} ve i_{qs} akımları, birim vektörler kullanılarak sırasıyla d^e ve q^e döner eksenlere uyarlanırlar. Aşağıdaki bağıntıları yazabiliriz [2].



Şekil 2.15. Birim vektörlerin sentezi

Buraya kadar biz vektör kontrolü rotor kaçak akısını ihmal ederek ele aldık. Fakat rotor kaçak akısının önemli miktarda etkisi vardır ve ihmal edilemez. Asenkron motor kaçak akısı hem vektör kontrolde hem de skalar kontrolde hava aralığı akısından daha çok gözönüne alınmalıdır. Çünkü hava aralığı akısı temel alınarak yapılan vektör kontrolde istenmeyen kararsızlık problemlerinin ortaya çıktığı gösterilmiştir. Hava aralığı akısı rotordaki kaçak akılardan dolayı kompanse edilmelidir.

$$\psi_{qr}^s = L_m i_{qs}^s + L_r i_{qr}^s$$

(2.24)

$$\psi_{qm}^s = L_m i_{qs}^s + L_r i_{qr}^s$$

i_{qs}^s terimi yok edilirse $\psi_{qr}^s = \frac{L_r}{L_m} \psi_{qm}^s - L_{lr} i_{qs}^s$

Buna benzer olarak d eksenini eşdeğer devresinden,

$$\psi_{dr}^s = \frac{L_r}{L_m} \psi_{dm}^s - L_{lr} i_{ds}^s \quad (2.25)$$

Bu bağıntılardaki rotor akılarının sentezi Şekil 2.16'da gösterilmiştir.

Rotor akısı ($\bar{\psi}_r$) ve Şekil 2.14'deki birim vektörler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$|\bar{\psi}_r| \sqrt{\psi_{dr}^2 + \psi_{qr}^2} = \sqrt{(\psi_{dr}^s)^2 + (\psi_{qr}^s)^2} \quad (2.26)$$

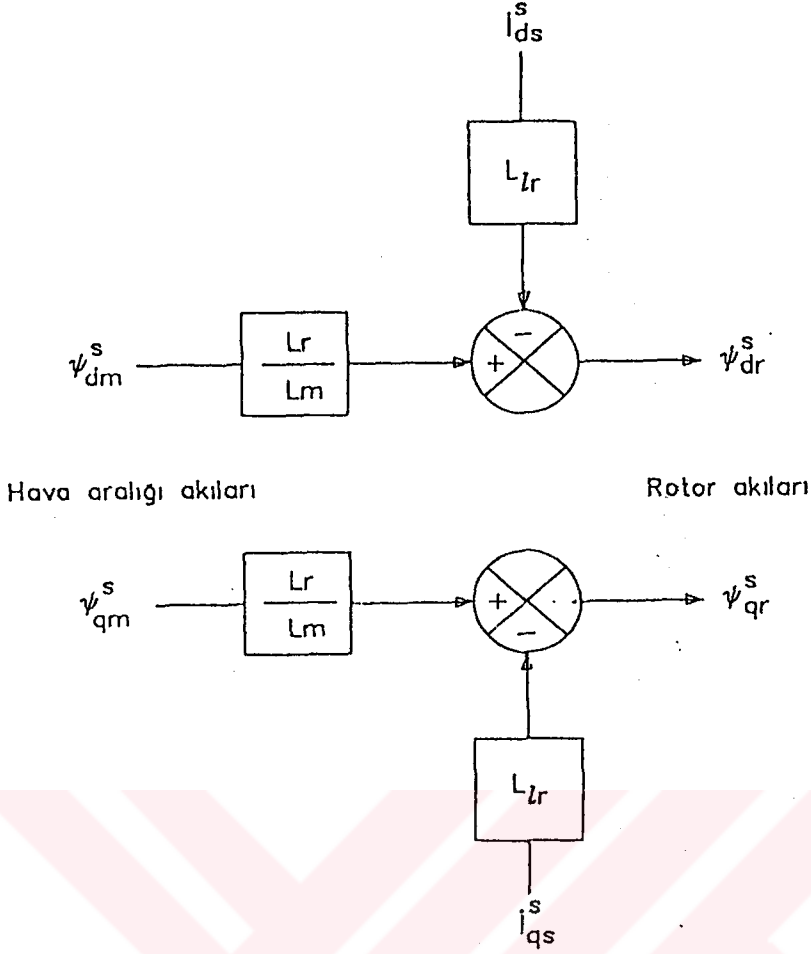
$$\cos \omega_e t = \frac{\psi_{dr}^s}{|\bar{\psi}_r|}, \quad \sin \omega_e t = \frac{\psi_{qr}^s}{|\bar{\psi}_r|}$$

Buraya kadar vektör kontrol, ani akım kontrollu PWM evirici kullanılarak anlatıldı. Momentin gerilimden çok akıma bağlı olmasından dolayı akım kontrolu daha uygundur.

Akım kontrolu çok istenmesi ile birlikte, evirici akım çevrimi içinde gerilim kontroluna da sahip olabilir. Ani faz akımı referans işareti gerçek faz akımı ile karşılaştırılarak hata işaretinden PI kompensatör üzerinden faz gerilimi işareti üretilebilir. Bu gerilim işareti yardımı ile taşıyıcı bir üçgen dalga üzerinden PWM gerilim dalgası üretilir. Alternatif olarak;

i_{ds} ve i_{qs} işaretleri gerçek i_{ds} ve i_{qs} akımları ile karşılaştırılır ve hata PI kompensatör üzerinden faz gerilim işaretleri V_{ds} ve V_{qs} gerilimleri üretilir.

Buraya kadar anlattığımız direkt vektör kontrol, düşük hızlarda akı sinyallerinin sentezlenmesi doğru olarak yapılamadığından %10 hız üzerindeki hızlarda doğru olarak uygulanabilir. Gerçekte, faz gerilimlerinden direk olarak integralle elde edilen akım işaretleri sadece



Şekil 2.16. Rotor akıları sentezi.

yüksek hızlarda kullanılabilir. Sıfır hız yakınlarında stator kayıplarını doğru olarak kompanse etmek oldukça zordur. Düşük hız bölgesinde rotor akısı hız ve stator akım işaretlerinden daha doğru olarak sentezlenebilir. Sabit koordinatlardaki q eşdeğer devresinden rotor eşitlikleri şöyle verilebilir [2];

$$\frac{d\psi_{qr}^s}{dt} + i_{qr}^s R_r - \omega_r \psi_{dr}^s = 0 \quad (2.27)$$

eşitliğin her iki tarafına $(L_m R_r / L_r) i_{qs}^s$ terimi eklersek,

$$\frac{d\psi_{qr}^s}{dt} + \frac{R_r}{L_r} (L_m i_{qs}^s + L_r i_{qr}^s) - \omega_r \psi_{dr}^s = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{qs}^s \text{ olur.} \quad (2.28)$$

$$T_R = \frac{L_r}{R_r} \quad \text{rotor zaman sabiti ise,}$$

$$\psi_{qr}^s = L_m i_{qs}^s - L_r i_{qr}^s \text{ ise} \quad (2.29)$$

$$\frac{d\psi_{qr}^s}{dt} = \frac{L_m}{T_R} i_{qs}^s + \omega_r \psi_{dr}^s - \frac{1}{T_R} \psi_{qr}^s \quad (2.30)$$

benzer olarak d eksenini eşdeğer devresinden,

$$\frac{d\psi_{dr}^s}{dt} = \frac{L_m}{T_R} i_{ds}^s + \omega_r \psi_{qr}^s - \frac{1}{T_R} \psi_{dr}^s \quad (2.31)$$

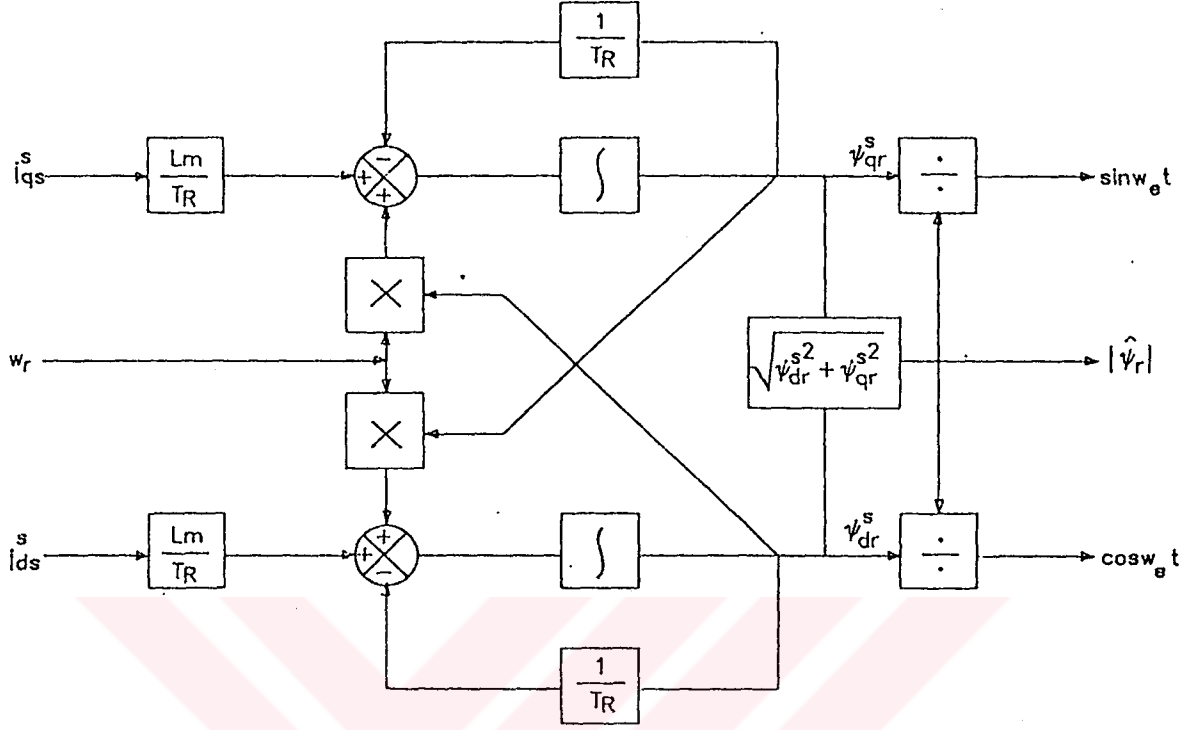
Elde edilen son iki eşitlik bize rotor akılarını, stator akımı ve hızın fonksiyonu olarak vermektedir. Bu bağıntıların simülasyon diyagramı Şekil 2.17'de verilmiştir. Girişteki i_{qs}^s ve i_{ds}^s işaretleri, faz akımı işaretlerinden üç faz/iki faz dönüşümü ile üretilebilir. Sağ tarafta ($\bar{\psi}_r$) rotor akısı ve birim vektörlerin üretilmesi gösterilmektedir. Bu yöntemle akı tahmini sıfır hızdan maksimum hıza kadar geçerlidir. Ancak tahminin makina parametrelerine bağlı olduğu unutulmamalıdır. Rotor direncindeki değişimler, sıcaklık değişimi ve deri etkisiyle daha da etkin olur. Şekil 2.15'de gösterilen birim vektör sentezi ile makina yüksek hızlarda çalıştığı sürece, parametrelerdeki değişim etkisi yeterli değildir. İşaretlerdeki harmonik bozulması direkt vektör kontrolde bazı problemlere sebep olur.

2.5. Harmonik Yoketme Yöntemi

Bu yöntemle bir kare dalganın istenmeyen harmoniklerinin yok edilmesi yanında temel gerilim bileşeni de kontrol edilebilir. Bu yöntemde kare dalga üzerinde önceden belirlenmiş açılarda kırılmış bölgeler oluşturur. Şekilde her yarım periyotta çeyrek dalga simetrisi vardır. Aşağıda gösterildiği gibi dört ateşleme açısı yardımıyla, üç harmonik bileşen yok edilebilir ve temel bileşen değeri kontrol edilebilir. Eğer daha fazla ateşleme açısı belirlenirse daha çok sayıda harmonik yok edilebilir.

Teori: Dalganın genel Fourier serisi şöyle verilebilir[2]

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.32)$$



Şekil 2.17. Hız ve statör akımlarından rotor akısının tahmin edilmesi.

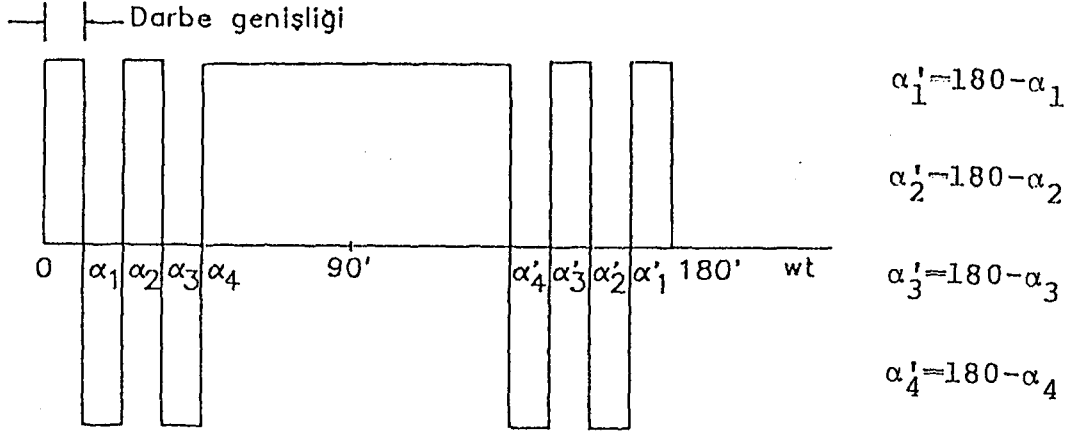
$$\text{burada } a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \cos n\omega t d\omega t \quad (2.33)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \sin n\omega t d\omega t \quad (2.34)$$

Çeyrek dalga simetrisi olan bir dalga şekli için sadece sinüslü tek harmonik bileşenleri olacaktır. Böylece katsayılar;

$$a_n = 0$$

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} v(t) \sin \omega t d\omega t \text{ olur.} \quad (2.35)$$



Şekil 2.18. Harmonik eliminasyon metodunda gerilim dalga şekli

Dalganın genliğini birim değerce $v(t) = \pm 1$ kabul edersek b_n katsayısı şöyle yazılabilir.

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\alpha_1} (+1) \sin n\omega t d\omega t + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (-1) \sin n\omega t d\omega t + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} (+1) \sin n\omega t d\omega t + \dots + \int_{\alpha_{k-1}}^{\alpha_k} (-1)^{k-1} \sin n\omega t d\omega t + \int_{\alpha_k}^{\pi/2} (+1) \sin n\omega t d\omega t$$

(2.36)

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin n\omega t d\omega t = \frac{1}{n} (\cos n\theta_1 - \cos n\theta_2)$$

bağıntısını kullanırsak, ilk ve son terimler şöyle olur;

$$\int_0^{\alpha_1} (+1) \sin n\omega t d\omega t = \frac{1}{n} (1 - \cos n\alpha_1)$$

$$\int_{\alpha_k}^{\pi/2} (+1) \sin n\omega t d\omega t = \frac{1}{n} \cos n\alpha_k$$
(2.37)

6 ve 7 bağıntıları 5 ile yerine koyup integrali alınır

$$b_n = \frac{4}{n\pi} |1 + 2(-\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_2 - \dots + \cos n\alpha_k)|$$

$$= \frac{4}{n\pi} (1 + 2 \sum_{k=1}^k (-1)^k \cos n\alpha_k)$$
(2.38)

bağıntısının k adet değişken içerdiğini görüyoruz. Bu durumda, bu değişkenlerin değerini bulmak için "k" adet bağıntıya ihtiyaç vardır. k adet α açısı ile temel bileşen kontrol edilebilir ve (k-1) adet harmonik yok edilebilir.

Örneğin 5. ve 7. harmoniklerin yok edileceğini ve temel bileşenin kontrol edileceğini düşünelim. 3 ve 3'ün katı harmonikler, eğer makina yıldız bağlı ve nötrü topraklı olursa oluşmayacaktır. Burada k=3 olur ve eşitlikler; temel bileşen

$$b_1 = \frac{4}{\pi} (1 - 2\cos \alpha_1 + 2\cos \alpha_2 - 2\cos \alpha_3)$$
(2.39)

5.inci harmonik

$$b_5 = \frac{4}{5\pi} (1 - 2\cos 5\alpha_1 + 2\cos 5\alpha_2 - 2\cos 5\alpha_3)$$
(2.40)

7.nci harmonik

$$b_7 = \frac{4}{7\pi} (1 - 2\cos 7\alpha_1 + 2\cos 7\alpha_2 - 2\cos 7\alpha_3)$$
(2.41)

Bu lineer olmayan eşitlikler, belirlenmiş olan bir temel harmonik genliği için nümerik olarak çözümlenerek α açıları bulunur. 5. ve 7.nci harmoniklerin yok edilmesi

sırasında, bunlardan sonraki en düşük harmonikler de (11. ve 13.üncü) oldukça azaltılmış olur. Bu harmoniklerin temel bileşene olan uzaklıklarına bağlı olarak etkileri az veya çoktur.

Düşük frekanslarda yok edilmesi gereken harmonik sayısı artacağından, α açılarının da sayısı artacaktır. Yarım peryottaki ateşleme açılarının sayısı veya saniyedeki komutasyon sayısı, evirici anahtarlama kayıpları tarafından sınırlanacaktır. Çok sayıda ateşleme açısı olmasının bir zorluğu, düşük frekansta, herhangi bir gerilim dalgası için α açılarının sayısı çok fazla olacağından, düşük gerilim-düşük frekans bölgesinde, sinüsoidal PWM yöntemi, yüksek gerilim-yüksek frekans bölgesinde harmonik yoketme yöntemi kullanılması daha uygun olacaktır.

Yüksek performanslı sistemlerde gerilim kontrolü istendiği takdirde, harmonik yoketme, sabit güç bölgesinde de yapılabilir.

2.6. Akım Kaynaklı Eviricinin Gerilim Kaynaklı ile Karşılaştırılması

Akım kaynaklı ve gerilim kaynaklı eviricilerin özellikleri açısından karşılaştırılması, uygulamaya bağlı olarak ne tür evirici kullanılması gerektiği konusunda yararlı olur.

Gerilim beslemeli bir evirici istendiğinde, bir akım kontrol çevrimi eklenerek, akım kontrollü olarak çalıştırılabilir. Aynı şekilde akım beslemeli de gerilim kontrol çevrimi eklenerek gerilim kontrollü olarak çalıştırılabilir. Fakat, bizim buradaki belirlememiz, eviricinin kaynağı, akım kaynağı mı, yoksa gerilim kaynağı mı olduğudur. Bu iki sınıf eviricinin özet olarak karşılaştırılması aşağıdaki gibidir [2].

1. Akım kaynaklı evirici, yükten daha çok etkilenir. Bu yüzden, evirici ile makina arasında uygunluk istenir. Örneğin, akım kaynaklı eviricinin düşük kaçak endüktanslı yükte çalışması daha uygunken gerilim kaynaklıda tam tersidir. Çünkü, bu parametre doğrudan komutasyon işlemini etkiler. Makinanın büyük kaçak endüktanslı olması, gerilim kaynaklıda harmonikleri filtre eder. Akım kaynaklıda ise, akım transfer zamanını artırıcı etki yapar. Böylece sıçrama gerilimi problemi yaratır. Evirici tristör veya diyotları seri olarak bağlanarak, normal gerilimin birkaç katı olan bu gerilime dayanması sağlanır.

2. Yüke bağlı komutasyon işleminden dolayı komutasyon zaman harcamaktadır. Sonuç olarak, yüke bağlı komutasyon açısı, hafif yük ve yüksek frekanslarda çok büyük olacağından, çok yüksek frekanslarda çalışma sınırlanmış olur.

3. Akım kaynaklı evirici, dört bölgeyi çalışmayı, hiç bir ekstra güç devresine gereksinim duymadan sağlayabilir. Buna karşılık gerilim kaynaklı eviricide doğrultucu ya ters paralel bağlı faz komutasyonlu bir eviriciye ihtiyaç duyar. Güç beslemesinde herhangi bir arıza meydana geldiğinde, akım kaynaklı eviricide üretilen enerji, hatlarda tüketilemeyeceğinden, makinanın mekanik olarak frenlenmesi gerekir. Gerilim kaynaklıda ise dinamik frenleme yapmak mümkündür.

4. Akım kaynaklı evirici daha sağlam ve güvenilebilirdir. Yükte bir anlık kısa devreler veya yanlış tristör ateşlemelerine tahammülü vardır. Arıza durumunda kapı devresinin zayıflatılması ile kesim yapmak kolaydır.

5. Akım kaynaklı eviricide tristörler belli bir süreye aşırı ters gerilime maruz kaldıklarından kullanılacak tristörlerin iyi seçilmesi gerekir. Ancak, gerilim kaynaklıda kullanılması gereken pahalı, kısa kesim süresine sahip tristörler yerine, daha ucuz, uzun kesim süresine

sahip tristörler kullanılabilir. Çünkü akım kaynaklı eviricide kesim süresi daha uzundur.

6. Akım kaynaklı eviricilerin kontrolü basittir.

7. Akım kaynaklı eviricilerle, birden fazla makina ve birden fazla eviricinin bir doğrultucudan beslenmesi çok zordur. Uygulamada bir doğrultucu, bir evirici ve bir makinadan oluşan sistemler kullanılır. Eğer çoklu makina ve çoklu evirici besleme gerekiyorsa gerilim kaynaklı eviriciler tercih edilir.

8. Akım kaynaklı eviriciler PWM gerilim kaynaklı eviriciye göre daha yavaş dinamik performansa sahiptirler. Diğer yandan kararlılık problemleri akım kaynaklıda, yüksek frekans düşük yükte çok görülür. Gerilim kaynaklı eviricide ise minimumdur ve kontrol sistemi, açık çevrim olarak çalıştırılabilir.

9. Akım kaynaklıda düşük frekansda çalışmada moment titreşimleri ve harmonik nedenli ısınmalar daha fazladır. Bu tür etkilerin kontrol edilmesi gerektiğinde bu eviricilerin kontrol kolaylığı kaybolmaktadır.

10. Akım kaynaklı eviricilerin başarılı olarak çalıştırılması için sisteme sürekli bağlı olması gereken minimum bir yüke ihtiyaç vardır. Yüksüz olarak çalıştırmaması bu eviricilerin genel amaçlı olarak kullanılmasını engeller.

2.7. GTO Tristör ve Sabit Hızlı Bir Asenkron Motorun Değişken Hızlıya Dönüştürülmesi.

Geçmişte yüksek ve orta gerilimli motorların kontrolünde kullanılan değişken hızlı A.A kontrol sistemlerindeki akım kaynaklı eviricilerin komütasyonu çok hantal ve yavaştı. Büyük kondansatörlü ve özel komütasyon devreleri olan, oldukça karmaşık devrelere ihtiyaç vardı. Sonuç olarak sabit hızlı sistemleri değişken hızlıya çevirmek

şimdiki kadar kolay değildi. Son zamanlarda, asenkron motor kontrolünde GTO kullanımı ile sağlanan gelişmeler bu devrelerde komütasyonu son derece basitleştirmiştir. Bu gelişmeler değişken hızlı sistemlere geçişi daha az karmaşık devrelerle yapma olanağı sağlamıştır. GTO kullanılması en büyük yararlarından bir tanesi de motor besleme geriliminin sinüse çok yakın olmasıdır. Bu düzenler, daha çok çalışmakta olan sabit hızlı bir asenkron motorun değişken hızlı olarak çalıştırılmasını düzenlediği için maliyetleri ve amorti süreleri düşüktür. Yatırımdan tasarruf sağlar.

1980'lerin başlarındaki petrol krizi birçok işletme yöneticisini fanlarda ve üfleyicilerde damper kontrolüne, pompalarda ve kompresörlerde kısma vanasına bağlı kayıpları önleme ve bunu kârı arttırma yönünde kullanmaya yöneltti. Fakat makinaların tahriki sabit hızlı motorlarla yapıldığı için, enerji tasarrufu sağlamada gerekli değişken hızı elde etmek için motorun değiştirilmesi gerekiyordu. Daha sonra yeni kurulmakta olan sistemlerde yük komütasyonlu eviriciler kullanılmaya başlandı.

Çalışmakta olan bir sistemin motorunu değiştirmek sadece yeni bir motor maliyeti ve montaj masrafı olarak düşünülmemelidir. Üretim kayıpları da gözönüne alındığında bu çok pahalıya malolabilir. Bu nedenle yöneticiler, mevcut sisteme adapte edilebilecek en düşük maliyetli sistemleri tercih etmektedir.

Yakın zamana kadar A.A kontrol endüstrisi bu talebi iyi bir şekilde karşılayamıyordu. Kontrol düzenleri, akım kontrollü ve yüke bağlı komütasyonlu dönüştürücüler kullanılarak gerçekleştiriliyordu. Fakat bu düzenler çok karmaşık komütasyon devrelerine ihtiyaç duyuyordu. Bu da ekstra kayıp, ek maliyet ve sistem hacminin büyümesi demekti.

Anlatılanlardan da anlaşılacağı gibi, karmaşık komütasyon devresine ihtiyaç duymayan basit bir A.A. eviriciye ihtiyaç vardı. Geliştirme laboratuvarlarında çalışmalar GTO'lar üzerine yoğunlaştırılmıştı. GTO'ların bir sinyalle kesim ve iletim yapabilmeleri istenilen çözümü sağlıyordu. Bu devre elemanlarının maliyetini düşürmek ve güvenilirliğini artırmak için uzun araştırmalar yapıldıktan sonra bugün endüstri için yeni bir kontrol sistemi olan GTO-Asenkron Makina Kontrolü (GTO-IMD) sistemleri geliştirildi. Bu sistemler sayesinde kullanılmakta olan sabit hızlı asenkron motorların değişken hızlıya dönüştürülmesi basit ve daha ucuz hale gelmiştir. Ayrıca komütasyon kolaylığı motor için zararlı olan bir çok etkiyi yok etmeye olanak sağlamıştır [3].

2.7.1. GTO-IMD Elde Edilebilir Güç Değerleri

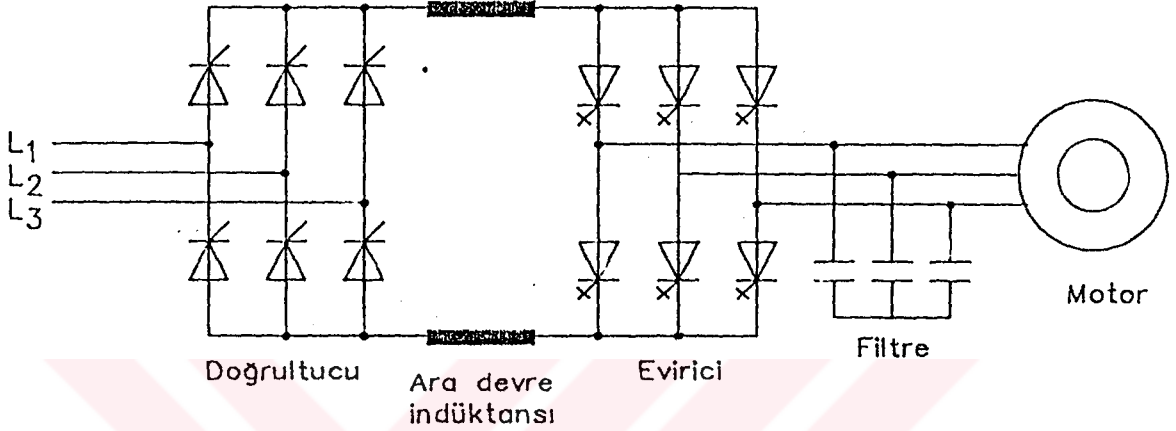
GTO teknolojisi kullanılarak yapılan bu kontrol düzenleri doğrudan yol verilmekte olan sabit hızlı asenkron motorlara adım adım yol verilmesini ve değişken hızlı olarak çalıştırılmalarını sağlamıştır.

Bu sistemler 12.000 HP'ye kadar paket olarak üretilmektedirler ve doğrudan orta gerilime bağlanarak çalıştırılabilirler [3].

Sistem Gerilimi (Volt)	Anma Gücü (HP)
2400	100-3500
3300	100-3500
4160	100-7500
6900	500-12.000

GTO-IMD sistemlerinde Şekil 2.10'da görüldüğü gibi dönüştürücü devresi; kaynak tarafında, ara devre doğru gerilimini üreten SCR tristörlerin kullanıldığı kontrollü bir doğrultucu, yük tarafında değişken frekanslı bir çıkış sağlayan GTO tristörlerin kullanıldığı bir evirici ve çıkış dalga şeklinin sinuzoidale yakın olmasını sağlayan

kapasitif filtre devresinden oluşmaktadır. Bu devre asenkron motorun %0-100 hız sınırları içerisinde düzgün bir elektriksel rezonansla çalışmasını sağlar.



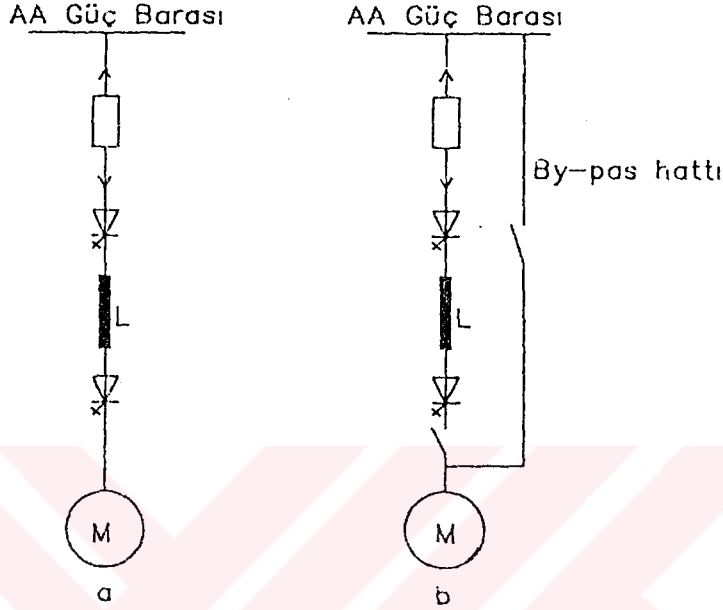
Şekil 2.19. GTO-IMD sistemin elektriksel şeması...

2.7.2. GTO-IMD Sistemi

Şekil 2.20a'da görülen bu kontrol sistemi akım kaynaklı bir evirici kullanılarak her iki yönde güç akışını sağlayacak şekilde düzenlenmiştir. Normal çalışmada güç akışı şebekeden motora doğrudur. Ancak bazı çalışma durumlarında enerjiyi motordan şebekeye doğru iletebilir. Motor milindeki enerjiyi şebeke değerine dönüştürerek güç sistemine geri verir. Bu generatör çalışma şekli yüksek ataleti olan makinelerde (büyük fanlar gibi) hızlı yavaşlamayı sağlamak için kullanılır.

Bu sistem her ne kadar çalışmakta olan sabit hızlı bir asenkron motoru değişken hızlı olarak çalıştırmak için düzenlenmiş olsa da tamamen yeni kurulmuş bir sistem kadar

iyi çalışmaktadır. Normalde kontrol sistemi, motor ile yol verme sistemi arasına basitçe bağlanır. Kontrol sisteminde çıkacak herhangi bir arıza durumunda motorun doğrudan çalıştırılması için bir by-pass hattı bağlanmıştır.



Şekil 2.20.a) Tek motor kontrol b) By-pass hatlı tek motor kontrolü

Birden fazla makinanın bulunduğu pompalama ve soğutma gruplarında kontrol sisteminin maliyetinden tasarruf etmek için şöyle bir çalışma uygulanabilir.

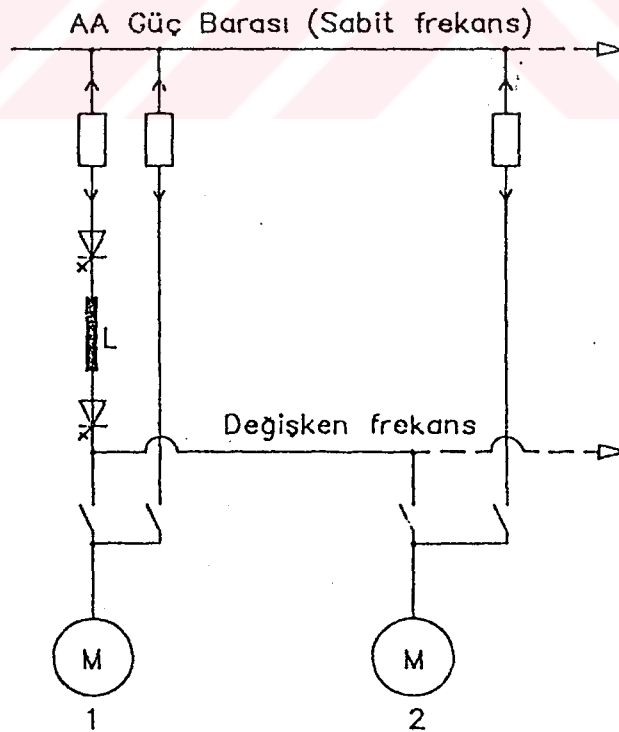
Şekil 2.20c'de bulunan bağlantı şeması çoklu motor kontrolüne ait bir devredir. Bu devrede motorlar sırasıyla devreye alınır veya devreden çıkarılır.

İşletmenin gerektirdiği çıkış büyüklüğünü sağlamak için önce 1. motor değişken frekanslı baradan beslenerek devreye alınır ve kontrolörün set edildiği çıkış değerini verinceye kadar hızı arttırılır. Eğer 1. motor nominal

hızında bile istenilen değeri sağlayamıyorsa, bu durumda 1. motor sabit frekanslı baraya transfer edilerek, 2. motor değişken frekanslı baradan beslenerek devreye alınır. Bu sıra takip edilerek istenilen çıkış değerini sağlayacak sayıda motor devreye alınır.

Çıkış kapasitesi düşürülmek istenirse bu defa motorlar sırasıyla devreden çıkarılır. Önce değişken frekanslı baradaki motor devreden çıkarılır, daha sonra sabit frekanslı baraya bağlı motorlar sırasıyla değişken frekanslı baraya aktarılarak, istenilen çıkış değeri sağlanıncaya kadar fazla motorlar devreden çıkarılır. Bu iki bara arasında motorlar transfer edilirken gerekli senkronlama sağlanır.

Bu çalışma şeklinin uygulanması halinde tek bir kontrol ünitesi ile bir çok motor kontrol edilmesi yanında motor koruma ve anahtarlama elemanlarında da önemli bir tasarruf sağlanmış olur.



Şekil 2.20(c). Tek kontrol ünitesi ile birden fazla motorun hız kontrolü.

Eğer nominal hızda çalışmada motor ve tahrik edilen makinada ek bir enerji birikimi varsa senkron üstü hızlarda çalışma yapılabilir. Senkron üstü çalışmada marjinal ek maliyetle ek bir verim sağlanmış olur.

Kontrol sistemlerine ve karakteristiklerine bakmadan önce GTO tristörün nasıl çalıştığı ve özellikleri konusuna bir göz atmakta yarar vardır. Çünkü bu yeni teknoloji GTO sayesinde gerçekleştirilmektedir.

2.7.3. Kapıdan Kesime Götürülen Tristör

GTO tristör yapı olarak SCR tristöre benzeyen dört tabakalı p-n-p-n yarı iletkenidir. 1960'ların başında, keşfinden itibaren SCR ile beraber gelişerek özel uygulamalarda önceliğini hep korudu. Son zamanlarda daha ticari bir özellik kazanmıştır. Yani; güvenilirlik, üretim kalitesi, maliyet ve cihazlarda kullanılabilirlik yönünden hatta sürücü sistemlerde kullanılabilirlik açısından benzer uygulamalarda kullanılan güç araçları ile karşılaştırılabilir durumdadır. Amerika'da daha iyi üretim teknolojileri ve uygulamadaki avantajları görülene kadar sınırlı kullanılmıştır. Asenkron motor uygulamalarında statik güç çeviricilerinde çıkış katındaki evirici de basit bir komütasyon sağlamaktadır.

GTO tristör aşağıda sıralandığı şekilde SCR'nin bütün özelliklerine sahiptir [3];

- A. Yüksek güç kazancı
- B. Yüksek gerilim tutma yeteneği
- C. Yüksek güç sınırları
- D. Yüksek akım dalgalanma yeteneği

Buna ek olarak, kapısına negatif bir işaret uygulandığında kesime geçme özelliği vardır. Aynı şekilde pozitif bir akım darbesi uygulandığında ilettime geçer. Sabit ya da değişken d.a. bara gerilimi ile çalıştırıldığı zaman SCR'deki komütasyonu sağlayan kapasitif elemanlara ihtiyaç

kalmamaktadır. Bu komütasyon elemanları kullanılmadığı için kayıplar önlenmekte ve verim daha da artmaktadır. Tabii yer ve ağırlık kazançları da olmaktadır. Yüksek anahtarlama frekansı ile daha hızlı kesime geçmeyi sağlamaktadır. Küçük hata akımlarını sınırlayıcı reaktörler eğer ihtiyaç duyulursa akustiği ve elektromagnetik gürültüyü azaltmaktadır.

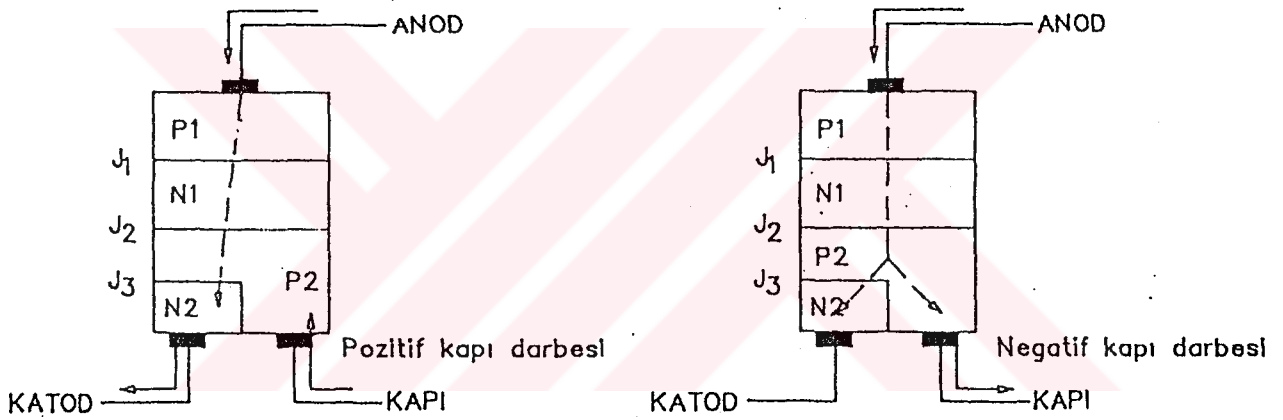
2.7.3.1. Basitleştirilmiş İşletim Teorisi

Şekil 2.21(a)'da görülen dört tabakalı yarı iletken yapı GTO ya da SCR'a uygulanabilir. Bunların iç yapıları farklıdır ama GTO daha gelişmiş olduğundan dolayı daha esnek bir kullanım alanına sahiptir. SCR basit yapıda üç fonksiyonlu bir elemandır. Anod ve katod arasındaki gerilim farkıyla pozitif bir darbe akımının kapısına uygulanması ile ilettime geçer ve bu durumda kalır. SCR dıştan gelebilecek ve titreşimler sonucu oluşacak iletim şartlarında tek darbe ile ilettime geçemez. Bu nedenle kapısına bir darbe katarı uygulanır. SCR bir kere ilettime geçtikten sonra eşit ya da büyük ters bir gerilimin uygulanması ile kesime geçer. Güçte ilettime geçme kazancı büyüktür. Bu özellik güç devrelerinde SCR'lerin transistörlere karşı kullanılmasının önemli bir nedenidir.

GTO ise Şekil 2.21(b) ve (c)'de gösterildiği gibi dairesel şekilde segmentlerden oluşan N_2 tabakasına sahiptir. Bu tabakanın kesim sırasında akımı yönlendirme etkisi vardır. Bu sanki bir çok GTO'nun paralel çalışması etkisini yapar. Eğer bu durum olmasaydı kapı yakınlarında katodun yalnızca bir kısmında akım durdurulabilirdi. Bu segmentler yalnızca milimetrik uzaklıklarda olup sayıları yüzleri bulmaktadır.

İletim/kesim karakteristikleri birbirleriyle hemen hemen paraleldir. Kararlı halde, segmentler arasındaki akım yoğunluğu farkları segmentler arasında sıcaklık farkına neden olmaktadır. Bu da kesim zamanında değişmelere ve bozulmalara yol açmaktadır. Kaliteli GTO'larda

segmentler olabildiğince paralel olmakta ve bu sayede kesim akımı eşit bir şekilde paylaşılabilir. İletim için darbe katarı ateşleme yapılır ve küçük bir akımla iletimde tutulabilir. Bu durumda segmentlerin durumunda herhangi bir kayma olma olasılığı da yoktur. İletimi sağlayan kapı darbesi SCR'da olduğu gibi 1-2 amper kademesindedir. Fakat negatif kesim darbesi oldukça yüksektir. Kesim kazancı, kesim sırasındaki anot akımı ile kesimi etkileyen negatif kapı akımının oranı olarak belirlenir. Tipik bir GTO için kesim kazancı 1/4'dür. Ancak darbe boyu çok kısa olduğu için gerekli güç minimum değerdedir [3].



a) SCR veya GTO da ilettime b) GTO da kesime geçme
geçme

Şekil 2.21. GTO ve SCR tristörlerin p-n-p-n yapısı ve iletim/kesim akım akışı.

GTO'lar değişik orta gerilim güç sistemlerinde kullanılan ekipmanlarda çok değişik akım oranlarına sahip olabilirler. Aşağıda tipik bir oran ve onun karakteristikleri sıralanmıştır [3].

- | | |
|-------------------------------|--------|
| a) İleri yönde tutma gerilimi | 4500 V |
| b) Kapı kesim akımı, max. | 1500 A |

c) Jonksiyon çapı	34 mm.
d) Kapı iletim akımı	1,5 A
e) Montaj kuvveti	1200 kg
f) İletime geçme süresi	8 Msn.
g) Kesime geçme süresi	18 Msn.
h) Minimum dv/dt	900 V/sn
i) Minimum di/dt	200 A/sn
j) İletimde aşırı akım	4500 A

Bunlar genellikle ileri yönde tutma gerilimi ve kesim akımı değerleri ile sınıflandırılırlar. Örneğin; 4500 V - 1500 A lık GTO gibi. Tipik olarak bu GTO lardan 2500 hp, 4160 V motor için bir eviricinin her kolunda dört adet seri olarak bulunabilir.



a) SCR



b) GTO

Şekil 2.22. SCR ve GTO nun grafiksel sembolleri

2.7.4. GTO-IMD Verimi

3000 hp GTO-IMD için tipik verim %93 seviyesindedir. Bu motor, sürücü devre, kaplin ve A.A güç barasının kayıplarını içermektedir. Bu değeri değiştiren en büyük faktör motor kayıplarıdır.

Motor kayıpları değişir. Büyük motorlarda verim daha yüksektir. Güç sabit tutulup hız arttırıldığında verim azalır, hız azaltıldığında verim yükselir. Bir 3000 hp,

1500 rpm motorun verimi %100 hızda ve yükte %96 olabilmektedir. GTO-IMD'nin verimi nominal çıkışta %97 ye ulaşmaktadır. Bu değer uygulamadan uygulamaya değişmektedir.

Teorik olarak GTO ve diğer statik güç dönüştürücüler havalandırmaya ihtiyaç duymazlar. Fakat bütün kullanıcılar bunu bünyelerinde bulundururlar. Bütün ortam sıcaklıklarında nemsiz hava bulundurmak daha az bakım ve bütün elektriksel elemanların uzun ömürlü olmasını sağlar. Özellikle nemli bir proses küçük miktarlarda da olsa paslanmaya yol açacaktır. Bu durum, özellikle sahil bölgelerinde önemlidir. Eğer sürücü devre kapalı bir odaya yerleştirilecekse, güç dönüşümünde yaratılan ısı, ayrıca diğer elektriksel ve mekaniksel ekipmanların kayıplarını da içerecektir. D.A. ara devre endüktörleri genelde hava soğutmalı olup açık havaya yerleştirilirler ve kayıpları %1/2 dir ve %97 içinde en küçük payı alan kayıptır. Eğer böyle değilse havalandırma için gerekli güç ünitesinin kaybı yaklaşık %2 dir. Bazı durumlarda izolasyon veya indirici transformatörler güç ünitesini a.a sisteme bağlamada kullanılırlar. Tam güçte %2 lik kayba %1 daha eklenir. Eğer, bu güç dönüştürücüsüne eklenirse motor terminalindeki verim %96'ya yaklaşır. Motor kayıpları olarak da %5 eklenirse, nominal güçteki A.A. baradan motor kaplinine kadar elde edilen verim %91 dir [3].

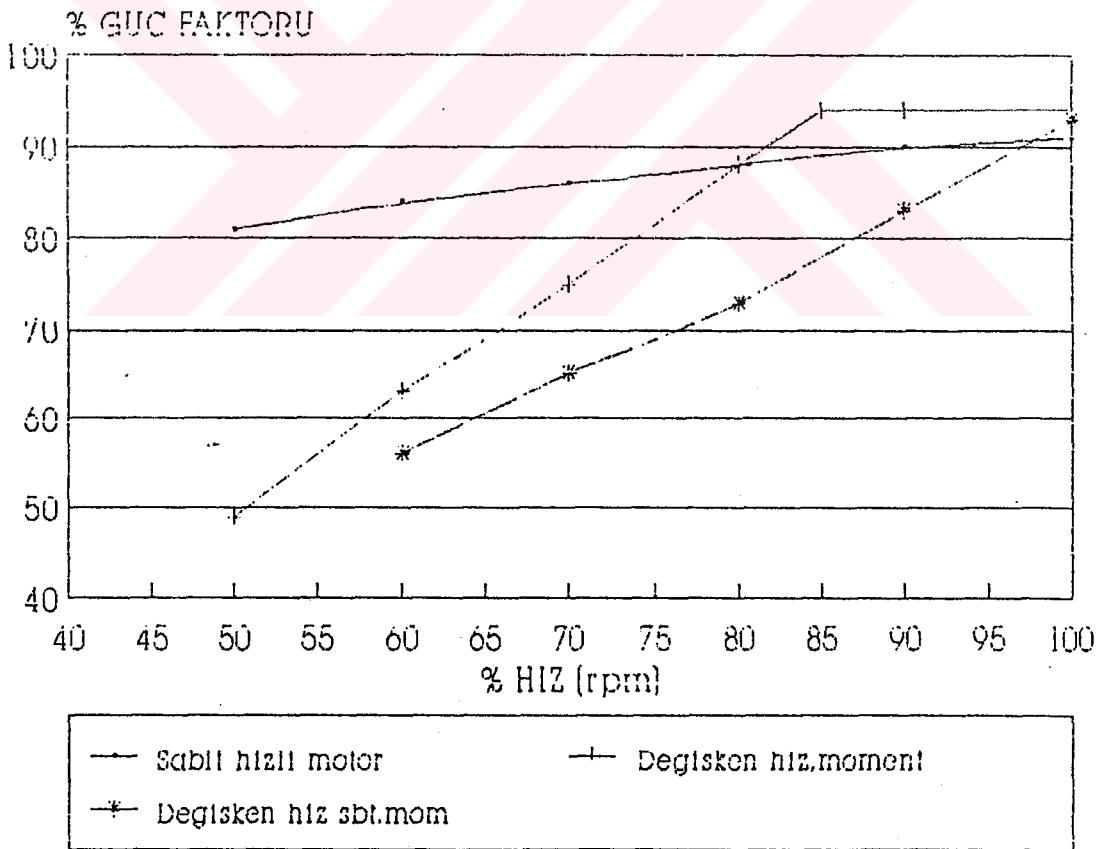
2.7.5. Güç Faktörü

GTO-IMD sisteminin güç faktörü, güç sistem barasından görülen, izolasyon trafosu ve dönüştürücünün kaynak tarafından doğrudan etkilenen bir büyüklüktür. Bu değer, faz gecikmesi ve harmonik distorsiyonunun bir fonksiyonudur. Pratik uygulamalarda faz gecikmesi d.a ara devre gerilimini azaltmak için tristörlerin ateşleme açılarını arttırırken gerçek kontrol edici faktördür. Güç faktörü normalde gerilimle doğru orantılıdır.

Sürücü sistemin hızı değişirken gerilimin frekansa oranı motor için çok önemlidir. Sistem hızı azaldıkça,

güç faktörü, lineer olarak azalmakta olan gerilim ve frekansla birlikte azalır. Bu oran sabit değildir. Ancak güç faktörünü yüksek tutmanın bir yolu; motor gerilimini, hız düşerken gerilim frekans oranı arttırıldığı sürece yüksek tutmaktır. Şekil 2.21 GTO sisteminin güç faktörü eğrisini göstermektedir. Sistem, gerilim ve güç faktörünü %100 ile %85 hızlar arasında sabit tutar. %85'in altındaki hızlarda hızla azalarak sıfıra kadar düşer.

Şekil 2.23. aynı zamanda sabit hızlı bir asenkron motorun güç faktörünün değişimini de göstermektedir. Görüldüğü gibi değişken hızlı bir sistemde güç faktörü sabit hızlı sistemdekinden daha yüksek olabilmektedir.



Şekil 2.23. Sabit hızlı ve değişken hızlı senkron motorun güç faktörlerinin karşılaştırılması.

2.7.6. Termik Isınma

Hız ayar sınırları içersinde çalışan bir makina, kalkış anında herhangi bir termik veya mekaniksel şoklara maruz kalmaz. Motor nominal hızda da pek nadir çalışmaktadır. Bu bir faydadır. Fakat 6 ya da 12 darbeleri dönüştürücülerin çıkış gerilim dalgası, harmoniklerden dolayı düzgün değildir. Bu sürücü devreer ile motor kontrolunda, motor ek ısınmalara maruz kalabilir. Bunun nedeni harmoniklerdir, Bu nedenle harmoniklerin yok edilmesi gerekmektedir. Harmonik ısısı genelde rotorda ortaya çıkar, shaft yardımı ile yataklara iletilir. Hava aralığındaki hava akışı ile de dolaylı olarak statora iletilir. Harmonikler, yüksek histeresiz fuko akımları ve dağılma kayıplarından dolayı ısınmalara neden olmaktadır. GTO-IMD sistemindeki kontrol stratejisinden dolayı ve küçük kapasitif filtreleri yardımıyla sinüse yakın bir çıkış elde edilir. Motordaki toplam ısınma prensip olarak harmoniklerin fonksiyonudur ve işletme koşullarına pek bağlı değildir. Sabit hızlı bir motorda, nominal yük ve gerilimde yük kayıpları, motorda nominal ısı üretmektedir. Fan, pompa, üfle-yici vs. iş makinaları, çoğu zaman sürücü çıkışından nominal gücün %5-15'i olan ihtiyacı tüketirler. Sabit hızlı sistemlerde, motor genelde vana veya damper kayıplarını da karşıladığı için sürekli nominal yükte çalışmaktadır. Sabit hızlı çalışan bir motorun değişken hızlıya dönüştürülmesi durumunda bu kayıp elemanları kaldırılacağından motorda %5-15 yük azalması meydana gelecektir. Bu durumda motor nominal yükten daha az olan gerekli gücü karşılar. Motor, nominal hızdan daha az hızda çalışacağı için motorda soğutmanın da azalacağını unutmamak gerekir.

2.7.7. Gerilim Salınımları

Bir motor üzerinde oluşacak gerilim salınımları (geçici gerilimler ve faz-nötr gerilimindeki dalgalanmalar gibi) güç tristörlerinin dv/dt değerlerine bağlı olarak ortaya çıkar. Bir eviricinin çıkışındaki dv/dt geçici gerilimi eviricinin tipine bağlı olarak değişmektedir. Gerilim kaynaklı eviricilerinde bu geçici olay, sabit bir

akım kaynağı olan akım kaynaklı eviricilerindekinden daha kötüdür [3].

Akım kaynaklı eviricilerde GTO'ların kullanılmasıyla, komutasyon üstünlüğü bu alandaki sorunları minimuma indirmiştir.

Evirici sistemlerinde faz-nötr gerilimi, motordaki faz gerilimi ve güç elektroniğindeki anahtarlama etkisinden dolayı ani ve kısa dalgalanmalar yapabilir. Normal olarak faz-nötr gerilimi zaman zaman fazlar arası gerilime eşit olur veya aşabilir [3].

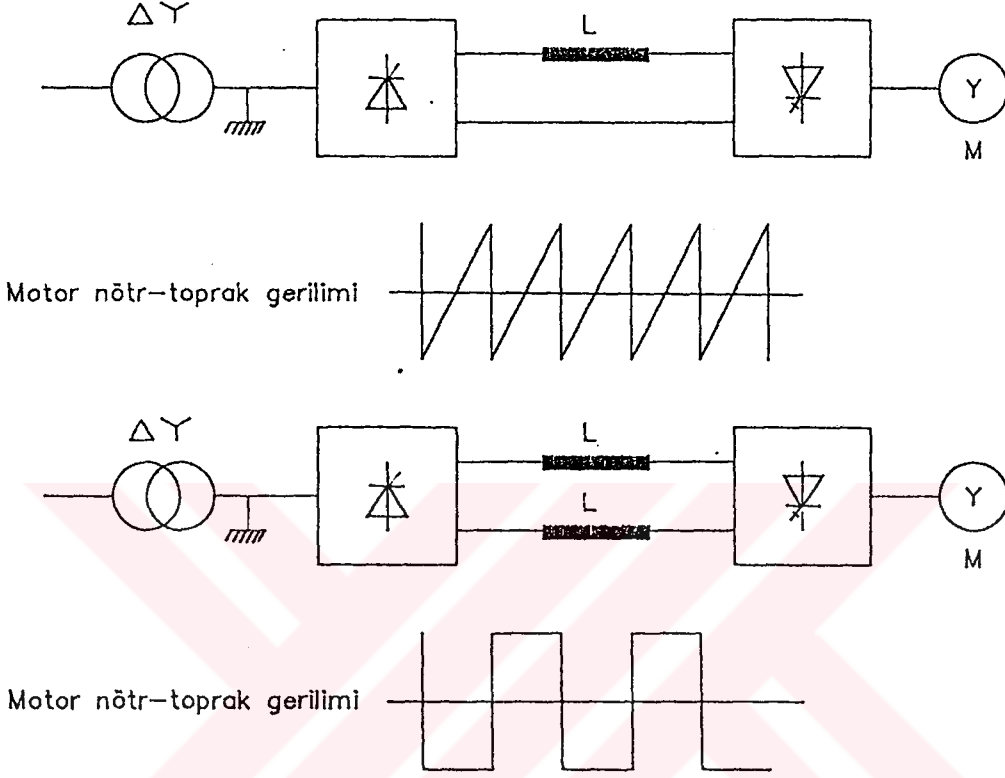
Şekil 2.24 kaynak tarafındaki transformatörün sekonderinde yıldız noktasının topraklanması durumunda, motor nötrünün toprağa göre gerilimini göstermektedir. Bu durumda transformatörün nötr noktası sabit kalır. Fakat ara devre d.a endüktansında oluşan gerilimden dolayı motor nötründe salınımlar olur. Eğer nötr topraklaması, çevirici çıkışında motor üzerinde yapılırsa motorun faz-toprak gerilimi düşük tutulmuş olur. Bu durumda da transformatörün nötr noktasında salınımlar olur. Transformatörün nötr noktasının yalıtım seviyesi genelde motor faz yalıtımından daha yüksek olduğundan, nötr noktasının toprağa göre gerilimi, motor tarafına göre daha düzenli salınımlar yapar. Bundan dolayı nötr topraklaması için en ideal yer eviricinin motor ya da yük tarafıdır [3].

Üç fazlı kapasitif filtrenin nötrü, uygun bir yere yerleştirilerek ya da akım sınırlayıcı küçük bir direnç kullanılarak bu iş gerçekleştirilir.

2.7.8. Moment Salınımları

GTO eviriciler rezonans durumlarında, harmonik akımlarının beslenmesini önlemek için akım kırpma yöntemi kullanarak elektriksel rezonansın zararlarını önler. Bu problemleri yok eder. Sonuç olarak; sürücü herhangi bir rezonans hızında, motor momentinde aşırı artma ve

ısınmadan dolayı bir problemle karşılaşmadan sürekli çalışabilir. GTO ile yapılan hızlı akım kırpma bir harmonik rezonans frekansında veya buna yakın değerlerde harmonik akım seviyesini normal değerine düşürür.



Şekil 2.24. Motor faz-nötr geriliminin ara devre endüktansına bağlı toprağa göre salınımı

Motor, ayarlanabilir hızlı sisteme uyarlanmadan önce bütün ömrü boyunca belli bir hızda çalışmaktadır. Bu nedenle, orijinal montaj yapılırken motor ya da bütün sistemin çalışma noktasının herhangi bir rezonans noktasında olup olmadığını görmek için kontroller yapılır. Sabit hızlı motor, hızlanma sırasında rezonans hızlardan hızlı olarak geçer. Buna karşın, değişken hızlı sistemlerde motor çalışma noktası bütün hız bölgesinde olabileceği için, motor ve dönen mekanik sistemin rezonans frekanstan etkilenip etkilenmediğini anlamak için saha testleri yapılmalıdır.

Motor ile tahrik edilen yük arasına konacak bir sönümleyici kaplin, sistemin, mekanik sistemdeki yüksek gerilimlerden ve aşırı titreşimlerden zarar görmesini önler. Akım kaynaklı eviricinin çıkış, eviriciye zarar vermeden direkt olarak kısa devre yapabilir. Fakat, motorda akı sönmesi olurken üretilen yüksek, geçici momentler sürülen sistemde problemlere neden olabilir. Böyle bir durum çok seyrek meydana gelmesine rağmen söndürücü kaplin kullanılmasını gerektiren bir nedendir.

2.7.9. Kontrol Sistemi

Sürücü ekipmanları, tamamen mikro işlemci tabanlı kontrol sistemlerine sahiptirler. Bu da röle gibi ekstra araçların kullanılmasını engellemektedir. Temel görevi, yangın devre kontrol, diagnostik, koruma fonksiyonları, operatör kontrol ve readout, harmonik azaltma, güç faktörü ve güç açısı fonksiyonları ile birlikte sürücü ekipmanlarını tamamen sayısal olarak kontrol edilebilir duruma getirmektir. Bu durum, hardware kullanmadan software çözümler getirilmesini sağlar ve sürücü parametreleri ile saha değişiklikleri yapılabilir. Kontrolde kararlılık ve kesinlik sağlar.

2.7.10. Arıza Arama (Diagnostik)

Prosesin yavaşlaması veya durması saat başına binlerce lira demektir. Onun için, operatör veya bakımıcının sistemde bir arıza olması durumunda, kısa sürede arızayı tespit edip normal çalışmayı sağlaması gerekir. Sürücü sistemlerin düzenlenmesinde, arıza arama ve bildirme üniteleri öngörülmektedir. Meydana gelen problemin çözülmesi için önce devre kartlarının değiştirilmesi, eğer arıza burada ise, bir an önce çözüme ulaşmayı sağlar. Sürücü parametrelerinde değişiklik yapmak için sayısal terminallerden yararlanılır.

BÖLÜM 3.

POMPALAR, FANLAR VE KOMPRESÖRLER

3.1. Genel

Bu iş makinelerinin bir çok ortak yanı vardır. Özellikle merkezkaç ve pistonlu tipler kendi aralarında birbirlerine benzerler. Merkezkaç tiplerde çark, akışkanı savurarak taşır, pistonlu tiplerde ise piston akışkanı iter. Özel tipler bu iki tipten birinin çalışma ilkesine uyar.

Yoğunluk değişmediği takdirde gazlar ve sıvılar birlikte incelenebilir. Kavram olarak her ikisini kapsayan akışkanların taşınmasında gerekli güç, akışkanın "Q" debisinin "p" toplam basıncı ile çarpımına eşittir. Bu güç, taşıyıcı sistemin verimine bölünerek elektrik motorunun vermesi gereken mil gücü bulunur [4].

$$P = Q \cdot p \quad P_m = \frac{Q \cdot p}{\eta} \quad \frac{P_m}{W} = \frac{Q}{m^3/s} \cdot \frac{p}{N/m^2} \quad (3.1)$$

Gerilim düşümüne, boru direncine vb. değerlerindeki değişime karşı motor gücü %10-15 büyük seçilir.

Formül (3.1) daha çok havalandırıcı ve üfleleticilere uygulanır. Toplam basınç, giriş ve çıkış basınçları arasındaki farka eşittir. Akışkan basıncı P_h , sürtünme basıncı P_s , dinamik basınç P_d ve basınç düşümü Δp 'nin toplamıdır.

Fizikten bilindiği gibi sabit d yoğunluğunda bir akışkanın h yüksekliğinde oluşturduğu akışkan basıncı yoğunluğunun yükseklik ve yerçekimi ivmesinin çarpımına eşittir.

$$P = P_2 - P_1 = P_h + P_s + P_d + \Delta p \quad P_h = d \cdot g \cdot h \quad (3.2)$$

Sürtünme basıncı akışkan yolundaki dirençleri yenmeye yarar. Örneğin, silindirik biçimli bir borunun sürtünme basıncı ℓ uzunluğuna, D iç çapına, λ sürtünme sayısına geçen akışkanın d yoğunluğuna ve V hızına bağlıdır. Dinamik basınç ise akışkanın ivmelenmesinden kaynaklanır ve hareket enerjisinin hacme bölümü olup, d akışkan yoğunluğuna ve V akışkan hızının karesiyle orantılıdır. Süreklilik denklemine göre V akışkan hızı Q hacimsel akımının A kesitine bölümüne eşittir.

$$P_s = \lambda \frac{\ell}{D} \cdot \frac{dv^2}{2} ; P_d = \frac{1}{2} dv^2 \quad v = \frac{Q}{A} \quad (3.3)$$

$$\frac{\lambda}{1} \quad \frac{\ell}{m} \quad \frac{D}{m} \quad \frac{d}{kg/m^3} \quad \frac{V}{m/s} \quad \frac{Q}{m^3/s} \quad \frac{A}{m^2}$$

$$P_f = P_s + P_d$$

SI birimleri ile yoğunluk 20° de ve normal basınçta hava için $1,293 \text{ kg/m}^3$, su için 10^3 kg/m^3 tür. Suyun yoğunluğu da sıcaklığa bağlı olup, yaklaşık 370°C de yarıya düşerek 500 kg/m^3 olur. Basınç kaybı en fazla borularda, dirseklerde, kesit değişimlerinde giriş ve çıkışlarda, vanalarda, süzgeçlerde vb. yerlerde oluşur. Vanalar ve boru dirseklerindeki basınç kayıpları pratikte boru uzunluğunu uygun bir miktar artırarak dikkate alınır.

Toplam basınçta en önemli kısmı oluşturan sıvı basıncından gidildiğinde pompa giriş gücü için ilk yaklaşıklıkta,

$$P_h = d \cdot g \cdot h \quad P_m = k \cdot \frac{Q \cdot d \cdot g \cdot h}{\eta} \quad k=1,1 \dots 1,4 \quad Q \cdot d = \frac{m}{t} \quad (3.4)$$

formülü kullanılabilir. Buna göre, gerekli motor gücü sıvının çıkarıldığı h yüksekliğine orantılıdır. Basınç

kaybını karşılamak için, pompa gücü $k=1,05...1,25$ katsayısı ile çarpılır. Pompa verimi, pistonlularda daha yüksektir ve %80-95 arasındadır. Merkezkaç pompalarda ise daha düşüktür ve %50-85 arasındadır. Salmastra sürtünmesi nedeniyle merkezkaç pompaların gücü $k=1,1...1,4$ arasında ve artan güce göre daha küçük seçilen bir güvenlik katsayısı ile çarpılır. Hacimsel akım (debi) ile yoğunluk çarpımı yerine "m" sıvı kütlesinin "t" taşıma süresine bölümü alınabilir.

Merkezkaç pompalar emiş yanında, atmosfer basıncına göre düşük bir alt basınç oluşturur. Bu sayede atmosfer basıncı sıvının emiş borusunda yükselmesini sağlar. Emme yüksekliği, fiziksel olarak atmosfer basıncının değeri ile üstten sınırlanır. Pompa emiş yanında basınç sıfır olursa, normal atmosfer basıncında emiş yüksekliği, en fazla 760 mm. cıva 1033,6 mm su 10 m su sütununa eşit olurdu. Pompa açık bir kaptan emiş yaptığında, emiş yüksekliği, pompa eksenini ile sıvı yüzeyi arasındaki yükseklik farkıdır. Eğer, kapalı bir kaptan belli bir basınçtan emiş yapılyorsa, basınç farkını bulmak için, sıvı basıncına kabın alt basıncı eklenir. Eğer üst basınç var ise bu basınç çıkartılır.

Çalışma ilkesinin merkezkaç kuvvete dayanması nedeniyle basma yüksekliği sıvının yoğunluğuna bağlı değildir. Kayıplar bir yana bırakılırsa, aynı bir merkezkaç pompa soğuk veya sıcak suyu, yoğunluğa bağlı olmaksızın bütün sıvıları aynı yüksekliği basar. Buna karşın sıvının statik ve dinamik basıncı, dolayısıyla güç gereksinimi basılan sıvının yoğunluğuna bağlıdır. Hatlardaki basınç kayıpları hesaplanırken sıvının yoğunluğu dikkate alınmalıdır [4].

Sınırlı emiş yüksekliği nedeniyle derin kuyularda, pompa derine yerleştirilir ve büyük bir taşıma yüksekliği sağlayacak biçimde seçilir. Motor yukarıda bulunur ve

uzun bir mil ile pompayı tahrik eder. Özellikle büyük derinliklerde yeğlenen çözüm sualtı pompasıdır. Bu çalışmada motor, pompa ile birleşik olup taşınacak sıvı içerisine daldırılır.

Merkezkaç pompa ve fanlar gerek yeni kurulmakta olan sistemlerde gerekse eski sistemlerin daha verimli çalıştırılmaları için değişken hızlı tahriklerin kullanılabileceği en uygun iş makineleridir. Bu makinelerin tahriği endüstride sabit hızlı motorlarla yaygın olarak yapılmaktadır. Dolayısıyla işletmedeki akışkan kontrolü büyük bir enerji sarfiyatına neden olan metodlarla yapılmaktadır. Değişken hızlı tahriklerin kullanılması aynı miktarda hatta daha büyük miktarlarda akışkan kontrolünü, işlem sırasında kayıplar oluşturmada yapma olanağı sağlar. Fakat, bu sistemlerin kullanılması için yapılacak analizlerin çok gerçekçi yapılması ve bazı yanlışlara düşülmemesi gerekir. Bu incelemenin asıl amacı bu yanlışlardan kaçınmaktır.

Belli bir işletme için, gerek klasik yöntemlerle akışkan kontrolü gerekse değişken hızlı tahriklerle akışkan kontrolü için ayrı ayrı hesap yapıp, her iki durumda harcanan enerji farkına bakarak iki sistemi karşılaştırmak gerekir.

3.2. Güç Bağıntısı, Genel Kurallar ve Karakteristik Eğriler.

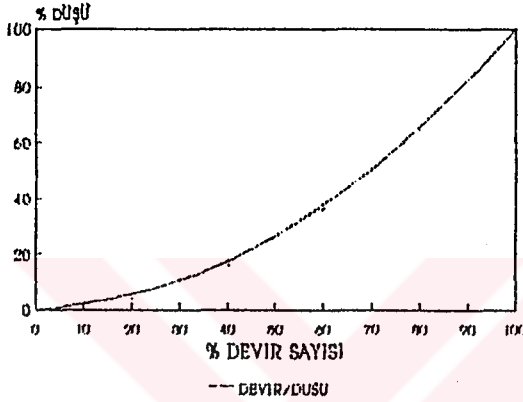
Yukarıda verdiğimiz güç denkleminde bakacak olursak gerekli mil gücü Q hacimsel akısına (debi) ve p toplam basıncına doğru orantılı η pompa verimine ters orantılıdır.

$$P_m = \frac{Q \cdot p}{\eta}$$

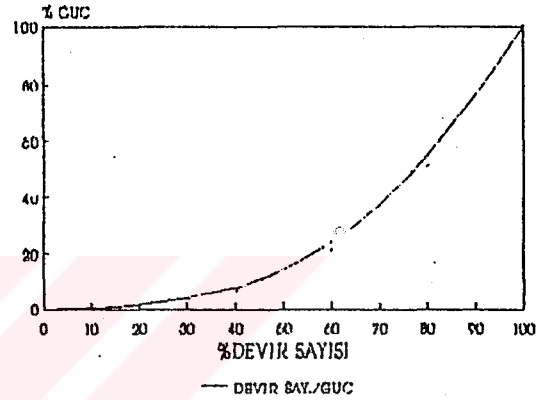
Gerekli olan debi, belirlenebilen büyüklük olduğuna göre, bizim elde edeceğimiz pompa veya fan verimi ve basınç (düşü), gerekli gücün hesaplanmasında kullanılan kritik faktörlerdir. Bu büyüklükleri bulabilmek için,

sisteme ait basınç debi eğrilerini ve kullanılan makinanın eğrilerini bilmek gerekir.

Merkezkaç (santrifüj) pompalar ve fanlar için söylenen herşey hız değişiminin, sistem performansı üzerine etkisine bağlı olan çekim yasaları ve fan yasalarından yola çıkılarak söylenmişlerdir. Bu yasalar hız, hacimsel akış, basınç ve güç arasındaki ilişkileri belirtirler. Bu ilişkiler birimsel değerlerle aşağıdaki gibidir [5].



Şekil 3.1 (b) DEVİR SAYISI/DÜŞÜ DEĞİŞİMİ



Şekil 3.1 (c) DEVİR SAYISI/GÜC DEĞİŞİMİ

$$n/n_1 = Q/Q_1 \quad (n/n_1) = H/H_1 \quad (n/n_1) = P/P_1$$

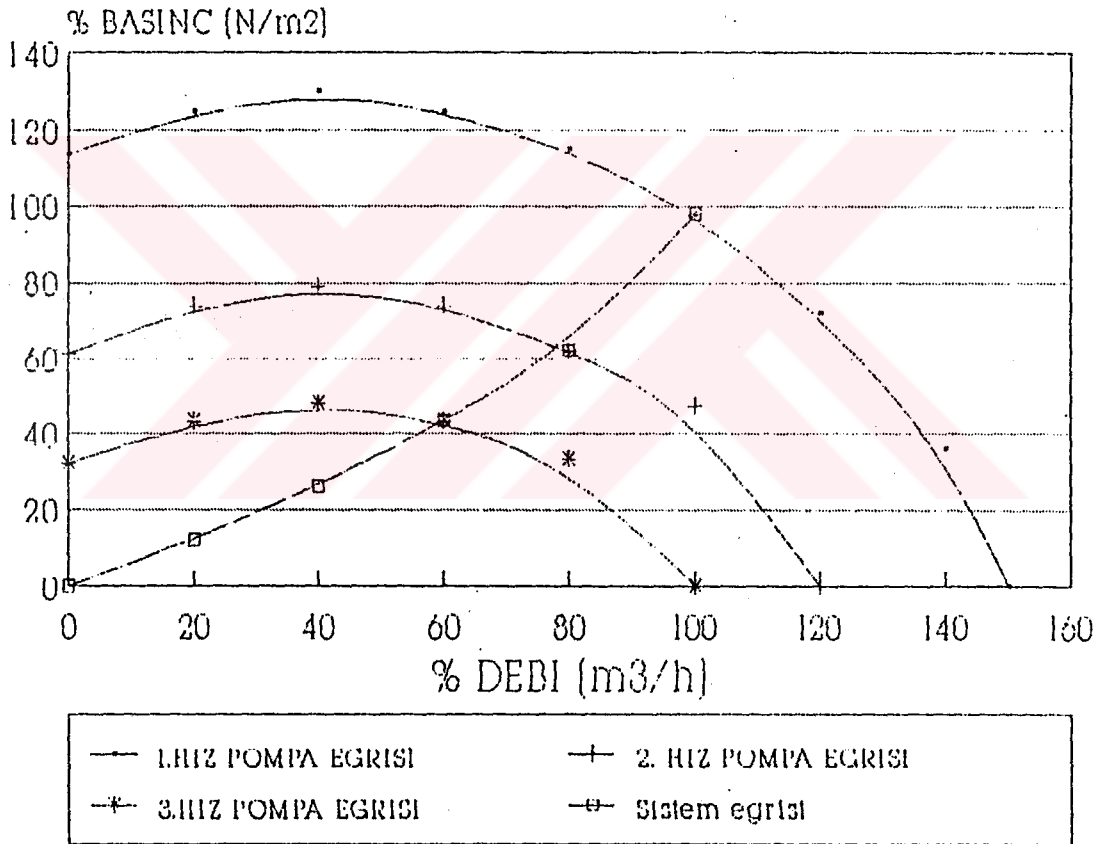
Şekil 3.1 Düşü ve gücün devir sayısı veya debi ile değişimi

Eğer bu büyüklükler arasındaki ilişkiler biliniyorsa, güç denkleminde ne gerek var diye sorulabilir.

Şunu bilmek gerekir ki; bu ilişkiler yalnız hız değişimi yapıldığı durumda pompa veya fan karakteristik eğrilerinde ortaya çıkacak farklılıkları tanımlarlar.

Gerçek uygulamalarda pompa veya fanların ihtiyacı olan güç, debinin küpü oranında azaltılmayabilir. Belki de çok daha büyük miktarda. Bu pompa veya fanın düşük debi ve hızda elde edilen basıncı, sadece makinanın karakteristiğine bağlı olmayıp, makinanın bulunduğu sistemin yapısına da bağlıdır. Bunun bilinmesi değişken hızlı tahrik sistemlerinin ekonomik değerlendirilmesinde çok önemlidir.

Merkezkaç pompalar ve fanlar Şekil 3.2'de görüldüğü gibi sabit bir pompa hızı için, sabit basınç (düşü)-debi karakteristik eğrisine sahiptir. Sabit bir hız için pompanın çalışma noktaları, bu eğri üzerindedir. Değişken hızlı tahriklerin kullanılması durumunda, nominal hız için çizilen eğrinin altında kalan bütün alan, çalışma alanı olur ve istediğimiz noktayı çalışma noktası olarak seçebiliriz. Tabii ki, bizim tahrik düzenimizin hız sınırları içerisinde olmak koşuluyla.



Şekil 3.2. Merkezkaç pompa veya fanın değişken hızda düşü/debi eğrileri.

3.3. Sistemin Düşü-Debi Karakteristikleri

Bir pompa sisteminde düşü (head) belirli bir debide ve çalışma hızında sıvıya verilen enerjidir. Pompanın bulunduğu sistemin düşüsü, önceden de belirttiğimiz gibi P_h

sıvı düşüşü (statik basınç), P_f : sürtünme kayıplarını ve hız düşüşünü karşılayan, sürtünme (dinamik) düşüşü giriş ve çıkış kayıpları gibi bileşenlerden oluşur. Statik düşüş yükseklikler arasındaki farka dayanır. Sistemin toplam statik düşüşü, basma sıvı seviyesi ile emme sıvı seviyesi arasındaki yükseklik farkıdır. Eğer emme veya basma sıvı seviyesinden biri, atmosferik basınçtan farklı bir basınç altında ise, bu basınçta statik düşüş için ayrıca düşünülmelidir.

Sürtünme düşüşü, boru ve hatlardan sıvının geçmesi ile oluşan sürtünme kayıplarını yenmek için gerekli olan düşüştür. Bu düşüş, akışkanın debisi, akışkanın cinsi, boru ve hatların ölçü, tip ve çalışma şartlarına bağlı olup eksponansiyel (üstel) bir fonksiyondur.

Hız düşüşü, akışkanın herhangi bir noktadaki kinetik enerjisidir. Eğer, akışkan verilen bir hızda hareket ediyorsa hız düşüşü, su kütlesinin bu hızı kazanmak için düşeceği mesafeye eşittir. Yüksek düşüşlü pompalarda hız düşüşü oldukça küçüktür. Fakat küçük düşüşlü pompalarda dikkate almak gerekir.

Bir santrifüj pompanın toplam düşüşü, basma düşüşü ile emme düşüşü arasındaki fark kadar pompaya verilen enerjidir. Eğer, emme düşüşü ile basma düşüşü ayrı ayrı hesaplanmadıysa toplam düşüş H aşağıdaki bileşenlerden oluşur [5].

$$H = h_2 - h_1 = H_{st} + h_f + h_i + h_e + (P_2 - P_1) \quad (3.6)$$

H : Toplam düşüş

h_2 : Basma düşüşü

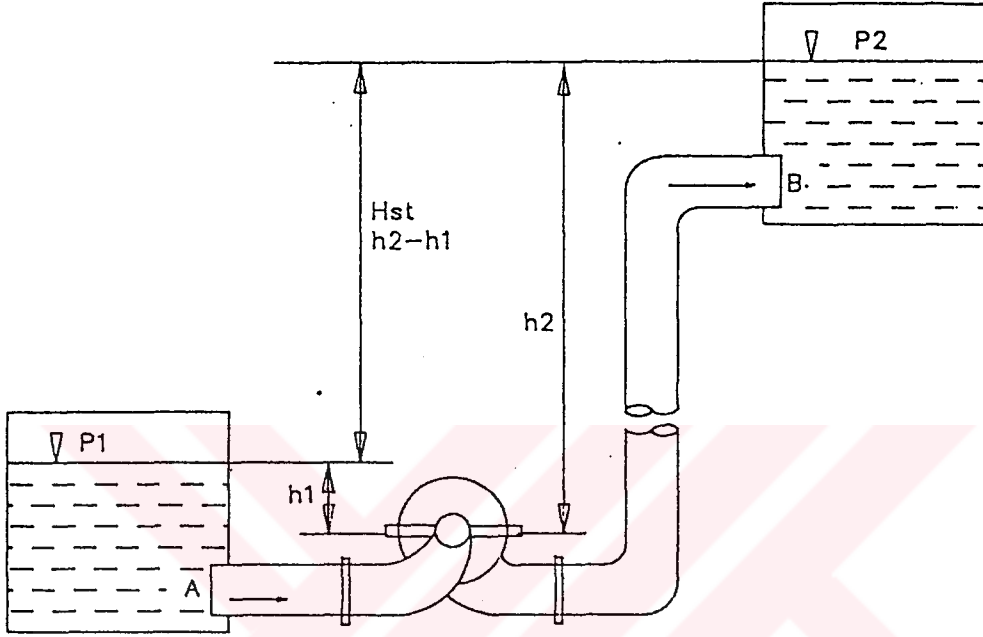
h_1 : Emme düşüşü

H_{st} : Emme seviyesinden basma seviyesine olan statik düşüş

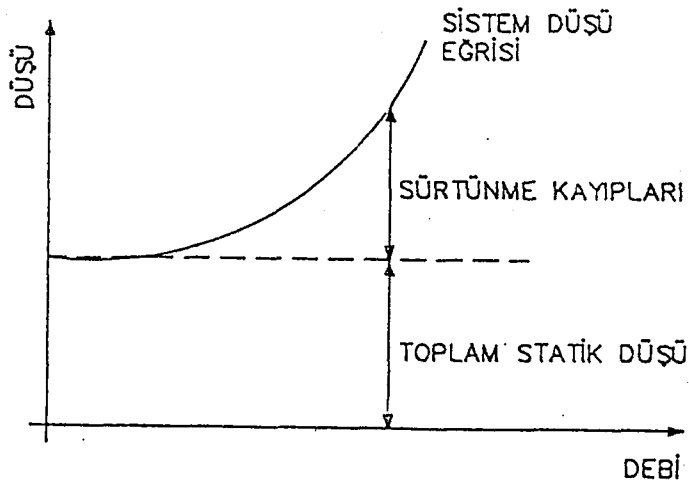
h_f : Tüm sistemin sürtünme kayıpları

h_i : Giriş kayıpları (A noktasında)

h_e : Çıkış kayıpları (B noktasında)
 P_2 : Basılan kabın basıncı
 P_1 : Emilen kabın basıncı



Şekil 3.3. Örnek bir pompalama sistemi.



Şekil 3.4. Sistem düşü-debi eğrisi.

Şekil 3.3'de anlattığımız ve bundan sonra inceleyeceğimiz sistemler pompa uygulaması hakkında olmakla birlikte bu bilgiler fanlar için de geçerlidir.

Sistem basıncını (düşüsünü) sağlayacak olan pompa basıncı söylediğimiz gibi iki ana bileşenden oluşur. Bu bileşenler, pompa sisteminin uygulanmasına bağlı olarak belirli oranlarda ortaya çıkarlar. Düşük debili çalışmada gerekli basınç ve güç, bu bileşenlerin oranlarına göre büyük değişiklik gösterir. Bunun daha iyi anlaşılması için aşağıda iki ayrı pompa uygulamasını inceleyeceğiz. Bu sistemlerin her biri bu basınç bileşenlerinin sadece birine sahip olduğu kabul edilecek.

Şekil 3.5. ve 3.6'da gösterilen sistemler basınç açısından birbirlerinden farklı olduklarından, düşük hızlı çalışmada yapılacak enerji tasarrufu da iki sistem için birbirinden farklı olacaktır.

Şekil 3.5'de statik basıncı olmayan %100 sürtünme düşülü bir sistem gösterilmektedir. Çünkü, kesitte bir değişiklik ve herhangi bir yükseklik farkı yok. Giriş-çıkış basınçları birbirine eşit. Pompa basıncı sadece boru boyunca oluşacak sürtünme kayıplarını önleyeceği için, %100 sürtünme olan bir karakteristik eğrisine sahiptir.

Bu örnek, fan yasaları temel alınarak incelenecek olursa, düşük debili çalışma noktasında, şekilde gösterildiği gibi değişken hızlı tahriklerin kullanılması ile sabit hızlı tahriklerin kullanılması durumunda sistemlerin gerektirdikleri pompa basınçları arasında büyük fark vardır. Bu basınç azalmasına ek olarak değişken hızlı sistemlerde pompa verimi hız azalması ile çok az düşerken, sabit hızlı vanalı sistemlerde vananın kısılması ile pompa veriminde büyük düşme görülecektir. Dolayısıyla pompanın gerektirdiği güç sabit hızlı sistemde çok az bir düşme gösterirken, değişken hızlı tahriklerin kullanıldığı

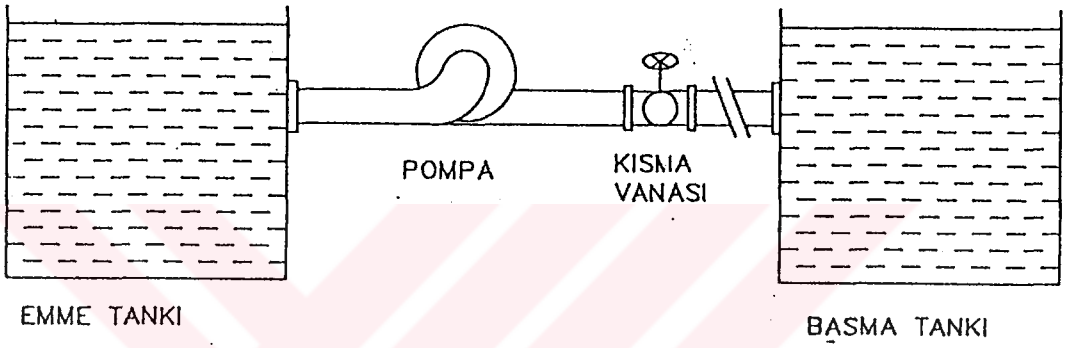
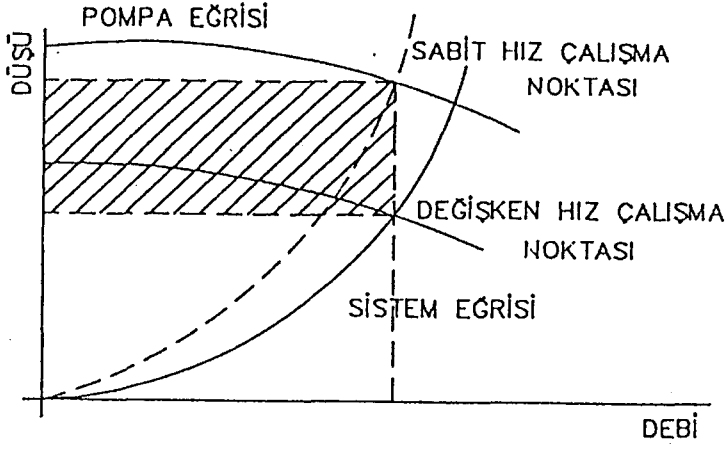
sistemlerde akışkan debisinin küpü oranında düşecektir. Öte yandan Şekil 3.6'daki sistem kısa boru hattına sahip olduğu için sürtünme kayıpları ihmal edilecek kadar küçüktür. Fakat, bir su tankına su basıldığı için tank içersindeki su sütunu pompa tarafından karşılanması gereken statik basıncı oluşturmaktadır. Bu statik basınç akışkan debisi ile değişmez. Şekil 3.6(b)'de gösterildiği gibi direnç eğrisi akışkan debisi eksenine paralel bir doğrudur. Düşük debili çalışma noktalarında, değişken hızlı tahriklerle, sabit hızlı tahriklerin kullanılması pompa basıncı veya verimi açısından Şekil 3.5'deki sistem kadar önemli değildir.

Bu örnekten anlaşılabacağı gibi endüstride bazı pompa ve fan uygulamalarında değişken hızlı tahrik düzenlerinin kullanılması ile enerji tasarrufu sağlamak mümkün değildir.

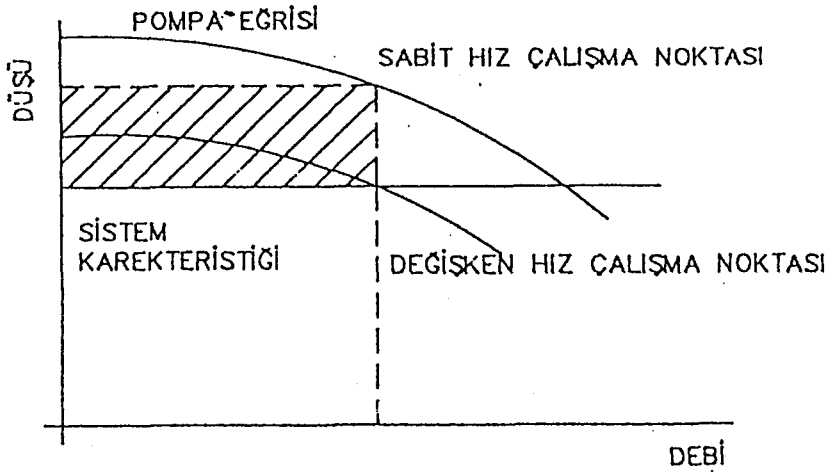
Şunu bilmek gerekir ki, sistem karakteristiği üzerinde ekonomik bir analiz yapabilmek için o sistemin nasıl bir sistem olması gerektiğini bilmek gerekir.

Çoğu sistem Şekil 3.3'de gösterildiği gibi uygulamaya bağlı olarak statik ve sürtünme basınçlarına bazı oranlarda sahiptir. Sistemin direnç karakteristiği olmaksızın enerji tasarrufu analizini yapmak, güç faktörü verilmeksizin kVA olarak güç ya da yük akımının verilmesi durumunda gerilim düşümünü hesaplamaya benzer.

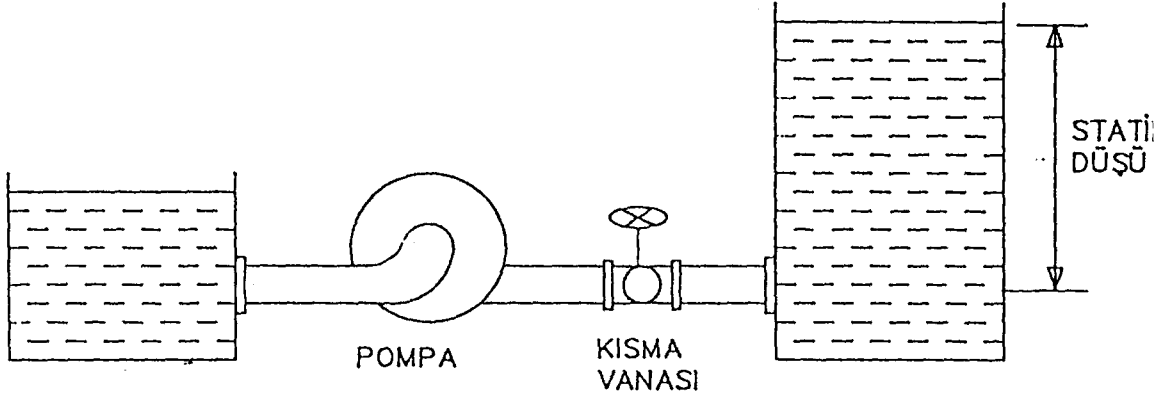
Genelde bir çok pompalama uygulamalarında daha çok statik basıncı büyük olan sistemlere rastlanırken fan sistemlerinde daha çok sürtünme basıncı büyük olan sistemlere rastlanır.



Şekil 3.5. %100 sürtünme düşülü pompalama sistemi
a) Karakteristik eğriler, b) Pompa sistemi



Şekil 3.6. a) %100 statik düşülü sistem karakteristiği.



Şekil 3.6. b) %100 statik düşülü pompalama sistemi.

BÖLÜM 4.

DEVİR SAYISI AYARI İLE AKIŞKAN KONTROLUNUN DİĞER YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Değişken hızlı tahrik sistemlerinin kullanılması, pek çok pompanın veya fanın basınç/debi karakteristiğinin kontrol amacı ile kullanılmasını sağlar. Pompa basıncının herhangi bir debi değerinde elde edilmesine izin vermesi, sistemin ihtiyacı olan basıncı sağlamada kolaylık sağlar. Motor ve pompa hızı azaltıldığında zaman, fan yasalarına göre pompa, karakteristik eğrisi azalan bir eğridir.

Nominal hızdaki bir basınç/debi eğrisi üzerindeki bir çalışma noktasına denk düşen düşük hızdaki eğri üzerinde bir nokta bulmak mümkündür. Düşük hızdaki basıncın değeri, nominal hızdaki basıncın hızın karesi oranında azaltılmış değeridir. Debi değeri ise, hız oranında azaltılmış değeridir. Böylece nominal hız eğrisinden yararlanarak, herhangi bir hız değeri için yeni bir eğri bulmak mümkündür. Ancak, daha önceki bölümlerde de açıkladığımız gibi gerçek basınç ve debi değerleri verilen bir hız için oluşturulmuş basınç/debi eğrisi ile sistemin eğrisinin kesiştiği noktadan elde edilir.

Aynı hız eğrisi, sistemin direnç eğrisinin yapısına bağlı olarak çok çeşitli debileri sağlayabilir. Normalde basınç ve/veya debi belirlenmiş büyüklükler, hız ise bunlara bağlı bulunan büyüklüktür. Onun için konunun incelenmesinde, hız değerinin bilinmesi çok önemli değildir.

Bir sistemde statik basınç değeri arttıkça gerekli hız, sürtünme basınçlı daha az bir hız gerektiren sistem değerinden, statik basınçlı daha çok hız gerektiren bir

sistem değerine yükselir.

Pompanın, istenilen bir noktada çalışmasını sağlamak için fan yasaları (genel kurallar) dan yola çıkarak pompa karakteristiği değiştirilir ve aynı zamanda sistem karakteristiği ile çalışma noktasında kesişmesi sağlanır. Bunu yaparken bir çok değişkenin bir çok şartı sağlaması gerekir. Bu nedenle iterasyon yöntemi ile bir hesaplama yapılması gerekir.

Şekil 3.5, 3.6, 4.1, 4.2(a) ve (b) ve 4.3'de pompalar, fanlar ve diğer makinalar için yaygın kullanılan akış kontrol yöntemlerinin, ayarlanılabilir hız ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Kolaylık maksadı ile Şekil 4.2(b) dışındaki bütün eğrilerin %100 sürtünmeli sistemlere ait oldukları kabul edilmiştir.

Değişken hızlı akışkan kontrolü ile karşılaştırılan yöntemlerin hepsine sabit hızlı sistemler demek tam doğru değildir. Çünkü bu yöntemler iki hızlı motorları, hız kaplinlerini kapsamaktadır. İki hızlı bir motorla tahrik edilen bir sistem, iki kademeli değişken hızlı sistem demektir. Bazı uygulamalar için iki hızlı sistemler maliyet açısından daha geniş değişken hızlı sistemlere alternatif olabilirler. Ancak iki hızlı sistemler, sürtünme düşüşünün büyük olduğu ve akış miktarının büyük oranlarda kısılması gereken yerlerde kullanılırlar. Bu sınırlamalar iki hızlı sistemlerin kullanılma alanlarını azaltır.

4.1. Çıkış Vanası ya da Damperi

Şekil 3.5 ve 3.6 da değişken düşünün olduğu yerlerde sabit karakteristikli bir pompa sisteminde basit ve yaygın olarak kullanılan akışkan kontrol yöntemi gösterilmektedir. Çıkış kısma valfi ek bir düşü oluşturarak, sistem direnç karakteristiğini, kesikli çizgi ile gösterilen uyarlanmış sistem eğrisi durumuna getirir. Çıkış damperi aynı işlevi fan sistemlerinde yapar. Gerekli olan pompa gücü çok az bir miktarda azalacaktır. Çünkü, debinin

düşmesine rağmen, düşüdeki artış bu etkiyi, gerekli güç açısından yok edecektir. Buna ek olarak pompa genellikle düşük verimde çalışır.

Sabit debinin gerektiği değişken karakteristikli sistemlerde Şekil 3.5 ve 3.6'da gösterildiği gibi sistemin düşü/debi karakteristik eğrisi bazı nedenlerden dolayı değişiklik gösterebilir. (işlem sırasında vanalardan dolayı kesit değişimi, akışkan seviyelerinin değişmesi, akışkan özgül ağırlığının değişmesi gibi nedenlerle). Karakteristik eğrisi azalan bir sistemde sabit akışı sağlamak için akışın vana ile kısılması, ek düşüden dolayı enerji kayıplarına neden olur. Değişken hızlı tahriklerin kullanılması durumunda ise; sistemin gerektirdiği düşüyü üreterek bu kayıpların oluşmasını önleyebiliriz.

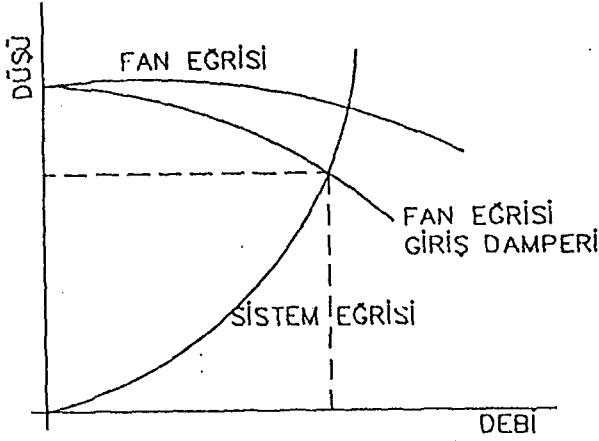
4.2. Giriş Vanası

Giriş vanaları ile bir fanda çıkış damperinden daha verimli bir akış kontrolü yapılabilir. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi gerekli akış seviyesinde, sistem karakteristiği ile kesişmesi için fan karakteristiği değiştirilir.

Giriş vanası, fan dönüş yönü doğrultusundaki gaz akışını ayarladığı için düşük akışta gerekli güç azalmış olur. Bu tip çalışmada dinamik basınç düşer. Fan hızının sabit olduğu durumlarda, basınç farkı debi ile azalmakla birlikte statik basınç sabit kalır. Giriş gücü debiye bağlı olarak çıkış damperine oranla daha fazla düşer. Yine de, giriş vanası ile kontrolde Şekil 4.10'da tipik verim eğrilerinde gösterildiği gibi kayıplar vardır ve değişken hızlı tahrik sistemleri ekonomik olarak bir alternatiftir.

4.3. Dolaştırma veya By-Pass Üniteleri

Sabit hızlı fanlar, sistemde nominal akışın gerektiği durumlarda bile nominal akışta çalıştıkları için bir enerji kaybına neden olurlar. Örneğin; sabit hızlı bir

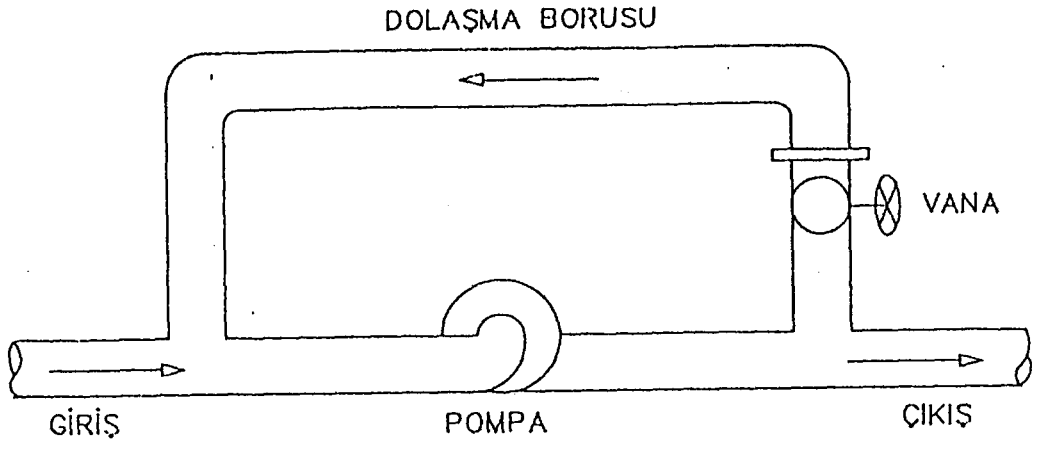


Şekil 4.1. Giriş damperi ile fan eğrisinin değiştirilmesi.

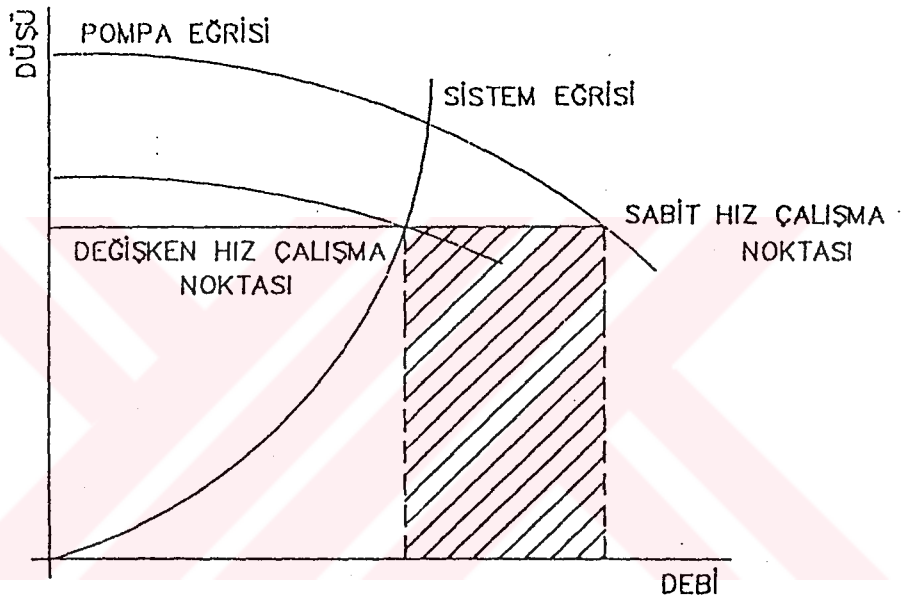
kule soğutma fanı, düşük akışta yeterli soğutma sağlayabileceği ortam sıcaklıklarında nominal akış sağlayacaktır.

İşletmenin ihtiyacından fazla olan akışkanın, doluşturma boruları gibi by-pass üniteleri ile geri döndürülmesi ancak akışkanın verimli kullanılması açısından fayda sağlar. Gerekli güç açısından ise, pompa sürekli nominal hızında çalışacağından ve pompa üzerindeki akış da nominal olacağından, nominal güç harcanması olacaktır. Pompa tarafından üretilen düşü, işletmenin gerektirdiği düşüye düşürülür. Ancak, sonuçta meydana gelen çalışma noktası Şekil 4.2(a,b)'de gösterildiği gibi düşük verimli bir çalışma noktasıdır.

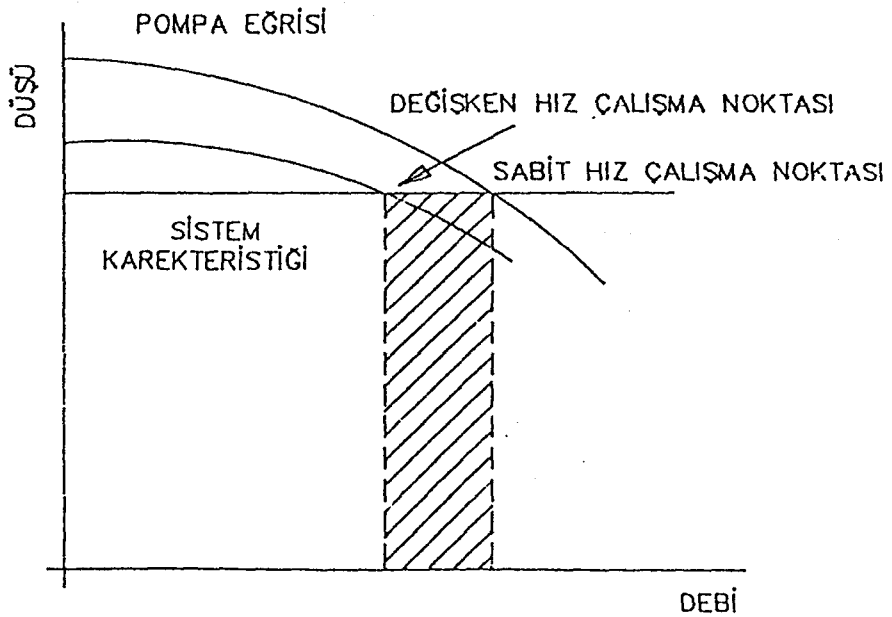
Eğer işletme sabit bir basınç gerektiriyorsa, sistemde sürtünme basıncı daha büyük olsa bile, sabit basınç kontrolünün yapılması için sistem karakteristiği %100 statik basınç gibi düz bir doğru olur. Böyle bir sistemde Şekil 4.2(b)'de gösterildiği gibi işletmenin gerçek gereksinimine bağlı olmaksızın pompanın nominal debi ve düşüde



Şekil 4.2 Dolaştırma (By Pass) Sistemi.



a) 100 % Sürtünme düşülü sistemde dolaştırma ünitesi



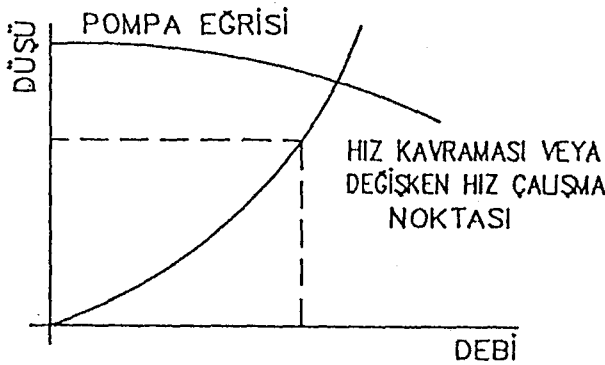
b) 100 % Statik düşülü sistemde dolaştırma ünitesi.

alışması gerekir. Değişken hızlı tahriklerin kullanılması ile bu problem ortadan kaldırılır ve önemli bir enerji tasarrufu yapılmış olur.

4.4. Hız Kavramları

Değişken hızlı çalışma için hidrolik ve magnetik (eddy corrent) kaplinlerin her ikisi de kullanılabilir. Pompa ve fan eğrilerinin sisteme uyarlanması değişken hızlı tahriklerde olduğu gibidir (Şekil 4.3).

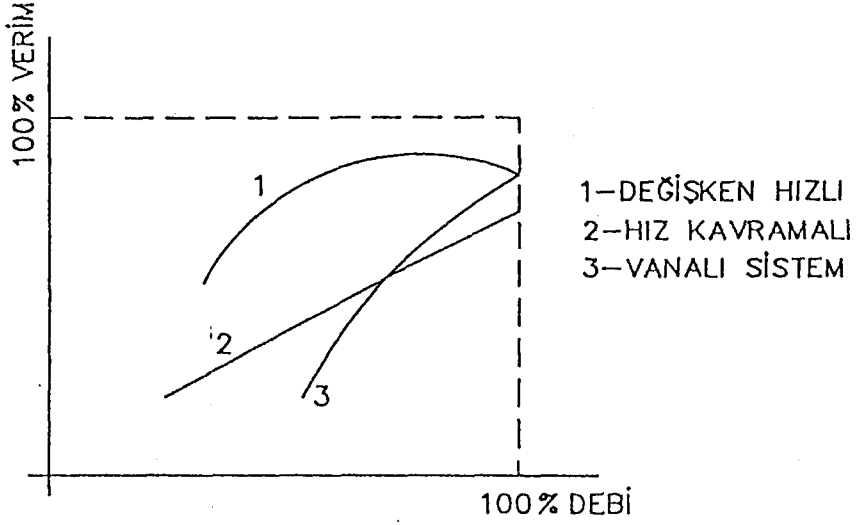
Değişken hızlı tahrik sistemleri, geniş bir hız bölgesi içinde verimli çalışma olanağı sağlar. Buna karşın hız kaplinleri ise, hız ile doğru orantılı azalan bir verimde çalışırlar (Şekil 4.4). Eğer hız düşürölmesi çok büyük miktarlarda değil ise, kavramadaki kayma veya sürtünme kayıpları çok büyük değildir. Buna rağmen kullanıcılar, hız kavramalarının fazla bakım gerektirdiğinden şikayetçidirler. Değişken hızlı tahrik sistemlerinin kullanılmasının en büyük nedeni olan enerji tasarrufu yanında az bakım gerektirmesi de göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.3. Hız kavraması ile çalışmada karakteristik

4.5. Gaz Akış Kontrolunda Enerji Tasarrufu

Hava hacminin değişken hızlı tahrikle kontrolunda



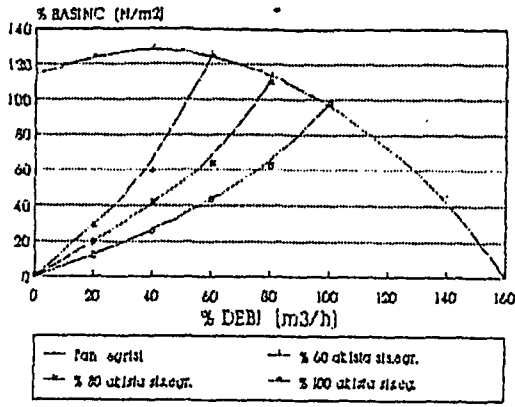
Şekil 4.4. Değişik akış kontrol yöntemleri için debi/verim eğrileri.

verimliliğin ne denli arttığı çeşitli fan eğrileri karşılaştırılarak görülebilir. Şekil 4.5'de çıkış damperi, Şekil 4.6'da giriş vanası, Şekil 4.7'de ise değişken hızlı tahrikle yapılan kontrollerde harcanan güçlerin miktarları yüzde olarak verilmiştir. Bu şekillerde kesiksiz çizgiler fan eğrilerini, kesikli çizgiler ise yük eğrilerini göstermektedir. Fan ve yük eğrilerinin kesişme noktaları, çalışma noktalarını belirler. Sağdaki grafiklerde %60, %80, %100 debi sağlamak için gerekli giriş gücü oranları verilmiştir [6].

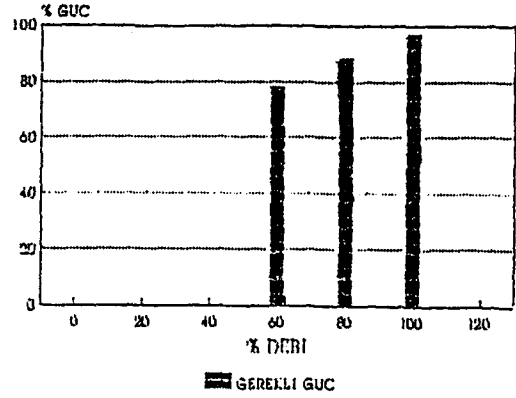
4.6. Sıvı Akış Kontrolunda Enerji Tasarrufu

Şekil 4.8'de tipik bir kısma valfi ile değişik debiler için elde edilen çalışma noktaları ve giriş güçleri verilmiştir.

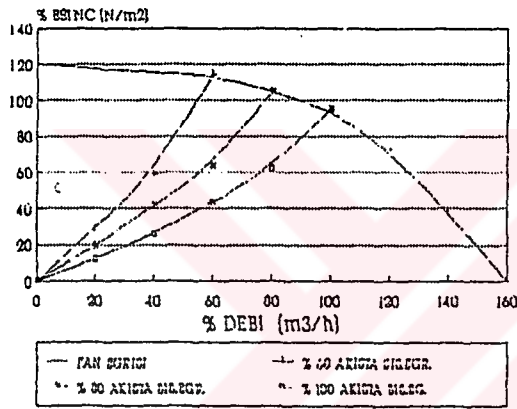
Şekil 4.9'da ise, değişken hızlı tahrik uygulandığında oluşacak durum gösterilmiştir. Bu son uygulama, sanki her çalışma noktası için ayrı ayrı uygun bir pompa seçimi yapılması durumundaki sonuçlara karşı düşmektedir. Yani hız, debiye göre ayarlandığı zaman pompanın verimli çalışacağını söyleyebiliriz.



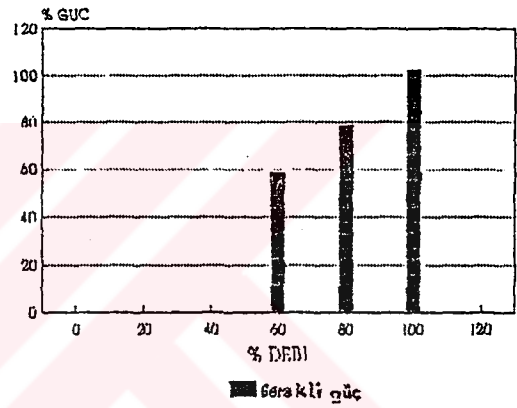
Sekil 4.5 (a) ÇIKIŞ DAMPERİ İLE KONTROLDA EĞRİLER



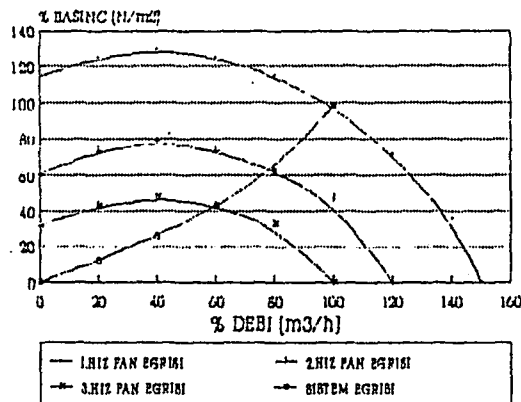
Sekil 4.5 (b) ÇIKIŞ DAMPERİ İLE KONTROLDA GEREKLİ GÜÇ



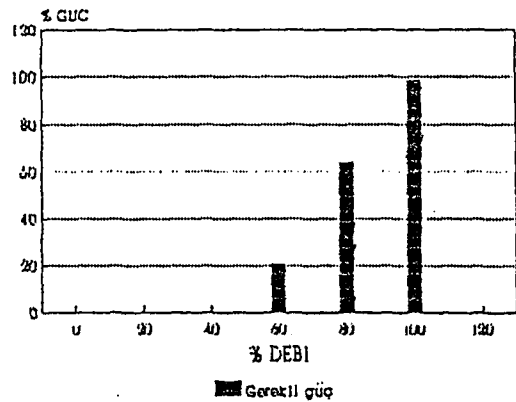
Sekil 4.6 (a) ÇIKIŞ VANASI İLE KONTROL



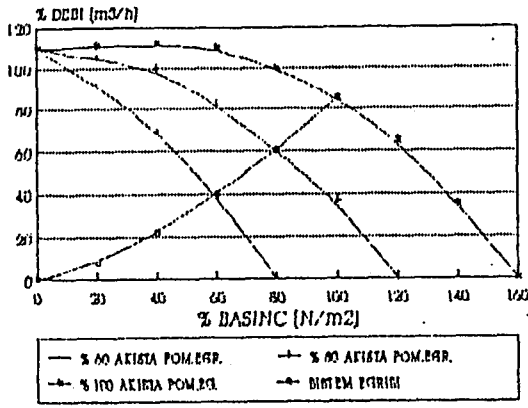
Sekil 4.6 (b) VANA İLE KONTROLDA GEREKLİ GÜÇ



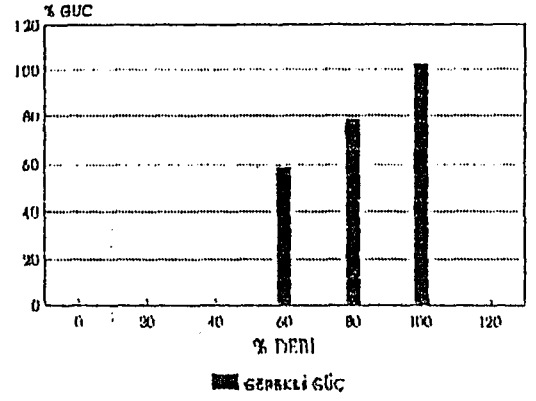
Sekil 4.7 (a) DEĞİŞKEN HIZ İLE KONTROLDA POMPA EĞRİLERİ



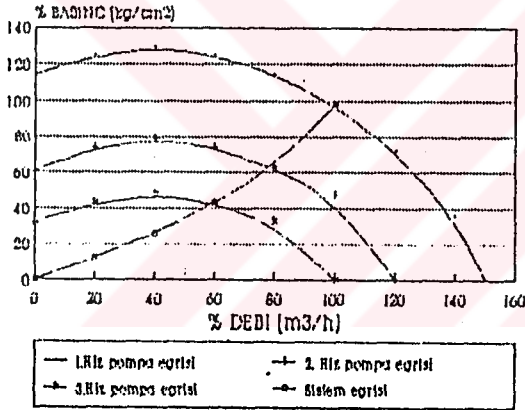
Sekil 4.7 (b) DEĞİŞKEN HIZ İLE KONTROLDA GEREKLİ GÜÇ



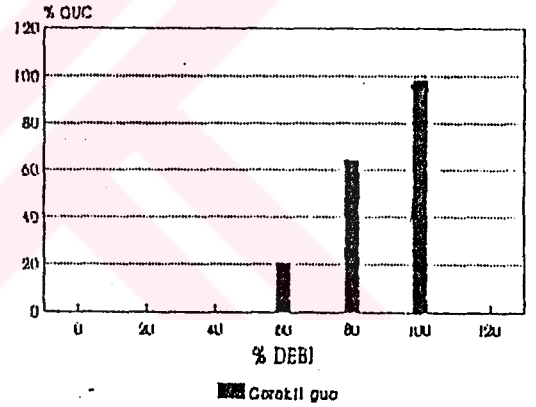
Şekil 4.8 (a) VANA İLE KONTROLDA POMPA EĞRİLERİ



Şekil 4.8 (b) VANA İLE KONTROLDA GEREKLİ GÜÇ

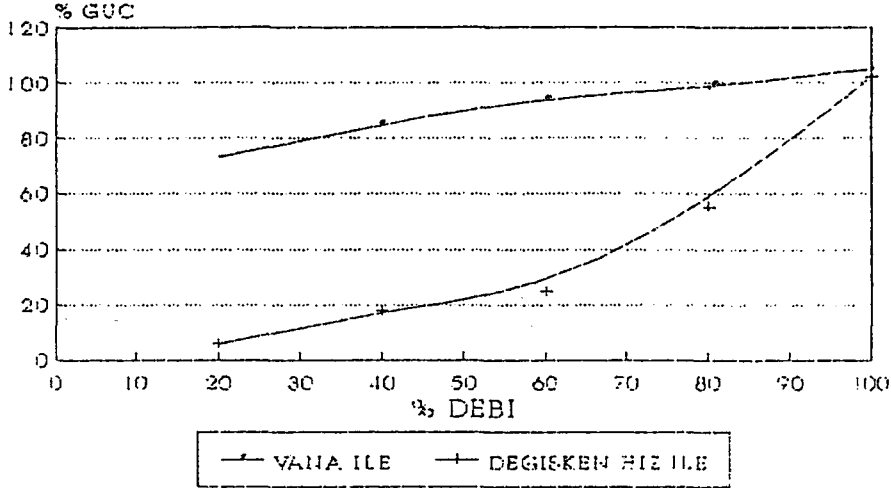


Şekil 4.9(a) DEĞİŞKEN HIZ İLE KONTROLDA POMPA EĞRİLERİ

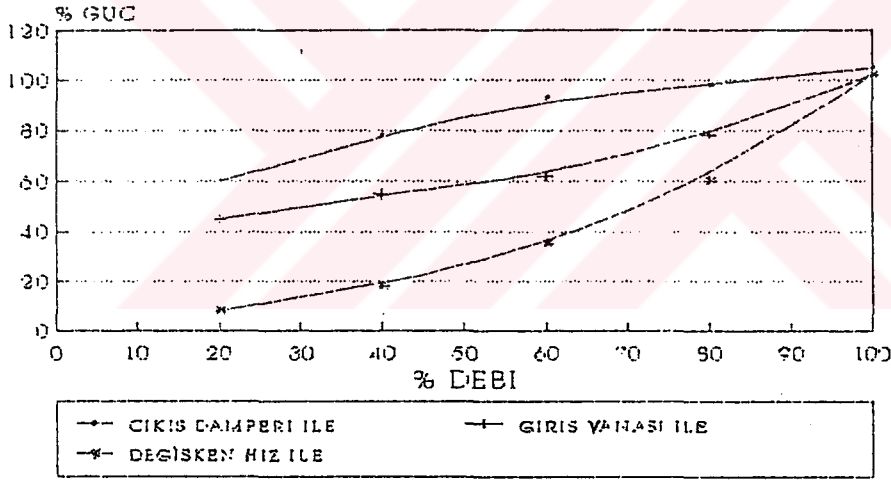


Şekil 4.9(b) DEĞİŞKEN HIZ İLE KONTROLDA GEREKLİ GÜÇ

Gaz ve sıvı akış kontrolunda, yukarıda anlattıklarımızı özetlersek Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterilen motor giriş gücünün debiyé bağılı değişimlerini veren eğrileri elde ederiz. Bu eğrilerden değişken hızlı tahrikte verimin ne kadar yükseleceğini açıkça görebiliriz [6].



Şekil 4.11 SIVI AKIŞ KONTROLUNDA GÜÇ DEĞİŞİMİ



Şekil 4.10 GAZ AKIŞ KONTROLUNDA GÜÇ DEĞİŞİMİ

BÖLÜM 5.

KULLANILAN ENERJİNİN HESAPLANMASI VE EKONOMİK DEĞERLENDİRMESİ

5.1. Gerekli Bilgiler

Pompa ve fan sistemlerinde, değişken hızlı tahriklerin kullanılması için, enerji tasarrufu potansiyelini hesaplamada gerekli bilgilerin özeti aşağıda verilmiştir [6].

5.1.1. Ayarlanabilir hızlı tahrik sisteminin karşılaştırılması gereken akışkan kontrol yöntemleri

- a) Çıkış vanası ya da damperi
- b) Dolaştırma sistemi (by-pass)
- c) Ayarlanabilir hız kavramaları
- d) Giriş vanası ya da damperi
- e) a, b, c ve d'deki sistemlerin iki hızlı motorla çalıştırılması;

5.1.2. Pompa ya da Fan Verileri

- a) Bütün uygulamalar için, çeşitli sıvı ya da gazlardan sadece bir tanesi ele alınarak işlem yapılır.
- b) Pompa verim eğrisi (Genelde basınç/debi eğrisinin aynısı)

5.1.3. İşletme Bilgisi

- a) Akışkanın özgül ağırlığı ya da yoğunluğu
- b) Sistemin basınç/debi eğrisi ya da yüzde statik basınç ya da nominal basınç, debi gereksinimi
- c) Sistemin debi/zaman diyagramı

5.1.4. Bütün Elektrik Sisteminin Verimleri

- a) Motorların (sabit ve değişken hızlı) verimleri
- b) A.A hız kontrol sisteminin verimi

- c) Dişlilerin verimi
- d) Transformatörlerin verimi

İkinci ve dördüncü kısımlardaki veriler hakkında ön bilgiye sahip olmak, geçerli bir varsayımda bulunabilmek için yeterlidir. Bu bilgileri elde etmek her zaman mümkün değildir. Ancak, eğer birinci ve üçüncü kısımlardaki veriler bilinmiyorsa kullanılan enerjinin hesaplanması çok zordur. Bu değişkenlerin, gerçekten farklı olması hesaplar üzerinde büyük etki yapar.

5.1.1. Değişken hızlı tahrik sistemlerinin diğer akışkan kontrol yöntemleri ile karşılaştırılması, önceki bölümlerde yapıldığından, burada tekrarlanmayacaktır.

5.1.2. Pompa veya Fan Verileri

Gerçek pompa/fan, düşü-debi eğrilerini veya verim eğrisini bilmek arzulanan bir şeydir. Fakat, bunu her zaman hazır olarak bulmak mümkün değildir. Endüstride kullanılmakta olan bir çok santrifüj pompa ve fanlar kolayca tahmin edilebilir karakteristik eğrilere sahiptir. Tip ve ölçülerine bakarak çok iyi tahminlerde bulunulabilir.

5.1.3. İşletme Bilgisi

Pompalanmakta olan sıvının özgül ağırlığı ya da gazın yoğunluğunun bilinmesi gerekli gücün hesaplanması için mecburidir.

Önceden de açıkladığımız gibi bir sistemin enerji tasarrufuna uygunluğunu belirlemede sistemin direnç karakteristiğinin yapısı çok önemlidir. Gerçek düşü/debi eğrisi bilinmiyorsa, nominal çalışma noktasında statik ve dinamik basınç yüzdeleri yani sistem eğrisinin pompa eğrisini nerede kestiği biliniyorsa eğri yeniden gerçek çalışma noktası için oluşturulabilir.

Makinanın çalışma süresi ve sistemin direnç eğrisi değişken hızlı tahriklerin kullanılmasının uygun olup

olmadığını gösterir. Örneğin; %20 süre ile çalışan bir sistem, çok verimsiz çalışsa bile bu sisteme değişken hızlı tahrik sisteminin uygulanması verimli olmaz. En iyi uygulama alanları, zamanın büyük bir kısmını düşük debide ve sürekli çalışarak geçerin sistemlerdir. Gerçekte tam yükteki bütün çalışmalarda debi, sistemin ihtiyacı olan debiden fazla olacaktır. Çünkü sistemler tasarlanırken %10 gibi bir fazlalıkla tasarlanır.

5.1.4. Elektrik ve Kontrol Sistemlerinin Verimi

Bu değerlerin, hesapların sonucu üzerinde pek büyük bir etkiye sahip olmamasına rağmen, sabit hızlı sistemler ile değişken hızlı sistem arasında verim bakımından farklılıkları görmek için, incelemek gerekir.

Eğer A.A kontrol sisteminde yalıtım trafosu kullanılacaksa, bu transformatörün kayıpları, kontrol sisteminin kayıplarına eklenmelidir. Diğer yandan, sabit hızlı sistemlerde ise, dişli sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu da bu sistemlerde verim açısından negatif etki yapar. Her iki çalışma durumunda motor kayıpları vardır. Genelde sistemler tam yük verimliliği ile çalışmazlar. Onun için gerçek yük verimliliği her durum için bulunmalıdır.

5.2. Hesaplama Yöntemi

Buraya kadar değişken hızlı tahrik sistemleri ile yapılan enerji tasarrufu hakkında bilgi verildi ve çeşitli çalışma durumlarında gerekli mil gücünün nasıl sağlanacağı anlatıldı. Ayrıca bu sistemlerin ekonomik analizinin yapılması için gerekli veriler belirlendi. Bundan sonra, bu noktadan hareketle adım adım hesaplama yöntemi anlatılacaktır.

1. Her akış durumu için mil gücü, değişken hızlı sistem ve karşılaştırılan sistem için (3.1) bağıntısı kullanılarak hesaplanır.

$$P_m = \frac{P \cdot Q}{\eta_p} \quad (5.1)$$

2. Her akış durumu için değişken hızlı sistem ve karşılaştırılan sistem için gerçek yükte verimlerini, elektriksel sistemin verimini ve giriş gücü hesaplanır.

$$P_g = \frac{P_m}{\eta_d \cdot \eta_m \cdot \eta_k \cdot \eta_t} \quad |kW| \quad (5.2)$$

P_g : Şebekeden çekilen güç

P_m : Motor mil gücü

η_d : dişli verimi

η_m : motor verimi

η_k : kontrol sisteminin verimi

η_t : transformatör verimi

Yukarıda formülde kullanılan verim değerlerinden sistemde olmayan varsa formülden çıkartılacaktır.

3. Toplam kullanılan enerji, her iki sistem için, yıllık peryod olarak hesaplanır.

$$E_g = P_g \cdot t \cdot 8,75 \quad |MWh| \quad (5.3)$$

t : sistemin yıllık çalıştığı zaman (p.u olarak)

4. Toplam enerji tüketimleri arasındaki fark, değişken hızlı sistemin sağladığı yıllık enerji tasarrufunu verir. Değişken hızlı tahrik sistemleri, büyük bir enerji tasarrufu sağlayabilirler. Fakat bu sistemlerin kurulması ve maliyeti önemli bir harcama gerektirir. Bu yüzden, sistemin kazandırdığı enerjinin parasal değerinin hesaplanıp, bunun başlangıç yatırımları ile karşılaştırılması gerekir. Böylece, bu projenin uygulanabilir olup olmadığını ortaya koyabiliriz. Bazı kabuller yaparak, kurulacak sistemin kendini ne kadar sürede geri ödeyeceğini daha önce verdiğimiz bir formülle basitçe hesap edebiliriz.

$$\text{Geri ödeme süresi (T}_g\text{)} = \frac{\text{Toplam proje maliyeti}}{\text{Enerji maliyeti} \times E_g} \quad (5.4)$$

Daha geliştirilmiş bir hesaplama yöntemi olarak ikinci bir yol da şudur [6],[7],

Bir projenin ekonomik olarak değerlendirilmesinde kabul edilen iki ölçü vardır.

T_g : Basit geri ödeme süresi

K : Yatırımdan sağlanan kazanç

Her ikisi de, vergi, yatırım kredileri, amortisman tipi ve süresi, enerji maliyeti ve enerji maliyetindeki yıllık artışlar göz önüne alınarak hesaplanır. Bu iki değer arasındaki en büyük fark, T_g 'yi hesaplarken paranın zaman değeri hesaba katılmaz. Fakat K'yı hesaplarken katılır.

T_g değeri, bir projenin ekonomik olarak değerlendirilmesinde bakılacak ilk değerdir. Bu süre enerji tasarrufu yoluyla yatırımın geri kazanılması için gereken süredir. Yöneticiler, bu sürenin 2-4 yıldan fazla olmamasını isterler.

K değeri T_g 'den daha doğru bir değerlendirme ölçüsüdür. Çünkü "K" paranın zaman değerini de hesaba katar.

Şimdi bu hesaplama yöntemini açıklayalım.

Y: Kurulacak sistem için gerekli yatırım (TL)

S: Yıllık tasarruf edilecek enerjinin değeri (TL)

n: Değerlendirme süresi (ekonomik ömür). Bu süre, sisteme herhangi bir harcama yapmaksızın (bakım masrafları hariç) işletilebilecek süre (Yıl)

K: Yatırımın yıllık getiri oranı. Daha açık olarak bu değer en az faiz oranı veya daha büyükse enflasyon oranına eşit olması gerekir ki bizim yatırımımız karlı olsun.

K'nın daha basit açıklaması; eğer para projeye harcanmayıp bir bankaya yatırılısaydı, getirileceği faiz oranına eşit veya büyük olmalıdır.

Eğer, kurulacak sistem kendini bir yılda amorti ediyorsa;

$$n = 1 \quad Y = \frac{S}{(1-K)} \quad \text{olmalı}$$

$$n = 2 \quad Y = \frac{S}{(1-K)} + \frac{S}{(1-K)^2}$$

$$n = 3 \quad Y = \frac{S}{(1-K)} + \frac{S}{(1-K)^2} + \frac{S}{(1-K)^3}$$

$$\vdots$$

$$n = n \quad Y = \frac{S}{(1-K)} + \frac{S}{(1-K)^2} + \frac{S}{(1-K)^3} + \dots + \frac{S}{(1-K)^n}$$

olmalıdır.

Bunu genel bir formül olarak yazarsak

$$Y = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left| \frac{S}{(1-K)^n} \right| \quad \text{olur.} \quad (5.5)$$

Bu eşitliği sonsuz seriye açarsak $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{x^n}$ serisi $n > 1$

$$\text{için yakınsaktır ve seri } Y = S \left| \frac{(1-K)^n - 1}{K(1-K)^n} \right| \quad (5.6)$$

terimine yakınsar $[7], [8]$.

Bu formülden çeşitli durumlarda yararlanarak projenin ekonomik analizini yapmak mümkün olmaktadır.

1. Eğer yıllık tasarruf miktarı biliniyorsa ve K' nin ne olması gerektiği belirlenmişse 3.10 bağıntısından belirlenmiş olan bir değerlendirme süresi (n) içerisinde yapılacak yatırımın ne olduğu belirlenir. Bulunan bu yatırım değeri projenin karlı olabilmesi için olması gereken en yüksek değerdir. Yani bizim yatırımımız, bu değerden küçük ise, karlı bir yatırımdır.

2. Normalde yapılacak yatırım bellidir. Yıllık tasarrufda, yapılan enerji tasarrufunun parasal değeri hesaplanarak bulunur. n değerlendirme süresi belirlenerek kurulacak sistemin yıllık getiri oranı K hesaplanır. Hesap lama sonucunda bulunacak " K " değeri enflasyon ve faiz oranlarından büyük olanı ile karşılaştırılır. Yatırımın karlı olabilmesi için K 'nin en az karşılaştırılan değer kadar veya bu değerden büyük olması gerekir.

Bu tür hesaplamada iterasyon yöntemleri kullanmak gerekir. Onun için, bu işi yapan bir paket program ekte verilmiştir. Bu program sayesinde farklı sistemler için bir çok yük durumlarındaki hesaplamalarda kolaylık sağlanır. Verilerin saklanması ve kullanılması açısından değerlendiriciye zaman kazandırır. Örnek uygulamalar kısmında verilen çıkışlar, bir uygulama için programın çalıştırılması ile elde edilmiştir.

5.3. Örnek Uygulamalar

Sabit hızlı olarak çalışan bir sistemin değişken hızlıya dönüştürülmesinde kullanılan motoru yeni sistemde de kullanmak yatırım miktarını azaltır. Bu sadece sistemin geri ödeme süresini kısaltmakla kalmaz, aynı zamanda montaj süresinden ve işçilikten tasarruf sağlar.

Eğer kullanılmakta olan motor iyi durumda ise çoğu zaman yeni motorun getireceği maliyetten kurtulmak için eski motorun kullanılması tercih edilir. Hatta bazı durumlar da yeni motorun sistem verimini arttırmasına rağmen, eski motorun kullanılması daha ekonomik olabilir. Aşağıda

verilecek örneklerde bu varsayımla ekonomik değerlendirme yapılmıştır.

5.3.1. Soğutma Kule Fanları

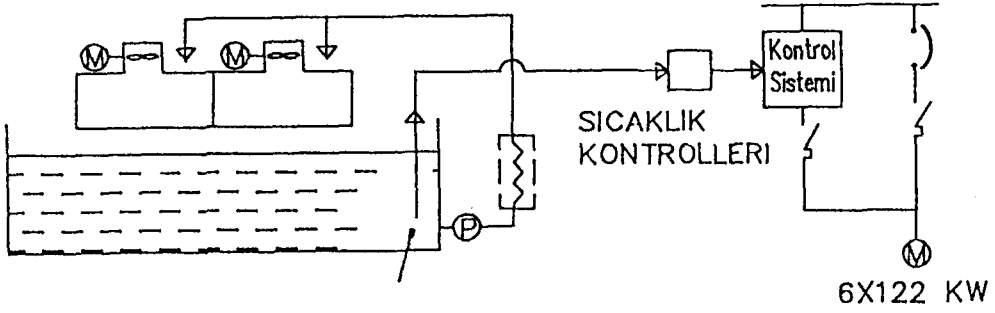
Demir-çelik fabrikaları gibi sıcak ortamların bol olduğu işletmelerde makina parçalarının soğutulması gerekir. Bu parçaların soğutulması sistemde bulunan açık veya kapalı su devreleri ile gerçekleştirilir. Kapalı devre sistemlerde dolaşan suyun yükselen sıcaklığı, ikinci bir soğutma suyu yardımı ile eşanjörlerde düşürülür. Ayrıca soğutma suyunun da sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Bu da, soğutma kulesi denilen kulelerden suyun damlalar halinde aşağı bırakılmasıyla sağlanır.

Özellikle yazları, sıcak havalarda bu damlalara ayrılmış suyun hava ile temasında yeterli soğuma sağlanmadığından bu soğutma kulelerinin üstünde soğutma fanları öngörülmüştür.

Bu fanları tahrik eden motorlar en kötü şartlara (en sıcak havalara) göre seçildiğinden soğuk havalarda düşük debide çalışmaları yeterli olmaktadır. Sabit hızlı motorla tahrik edilmekte olan bu kule fanları sabit hızla çalıştıktıklarından yılın büyük bir bölümünde gereksiz enerji tüketimine neden olmaktadırlar.

Aşağıda, şekilde gösterilen bu sistemin değişken hızlıya dönüştürülmesinde sağlanacak enerji tasarrufu şöyle hesaplanabilir.

Örnek olarak su tesislerinde bulunan iki adet soğutma kulesini alacak olursak iki adet kulede 6 adet 150 Hp gücünde fan motorları vardır. Var olan sistemde bu motorlar soğuk ve sıcak havalarda aynı yükte çalışmaktadırlar.



Şekil 5.1. Su soğutma kulesi prensip şeması.

Soğutma fanlarının yılın soğuk aylarında düşük debili çalışması işletmenin ihtiyacına cevap verebilmektedir.

Çalışma şekli, ortalama olarak;

Ocak, Şubat, Mart	: %50 akış
Nisan, Mayıs, Haziran	: %75 akış
Temmuz, Ağustos, Eylül	: %100 akış
Ekim, Kasım	: %75 akış
Aralık	: %50 akış

Yılın 1/3'ü %50 akış, 1/4'ü %100 akış ve 1/3'ü %75 akışta çalışması yeterli olmaktadır. Buna göre sağlanacak enerji tasarrufu, Şekil 5.2'deki fan eğrilerinden %50 debide sabit hızlı %60 güç harcar.

%50 debide değişken hızlı %18 güç harcar.

Şekil 5.2'ye göre gerekli motor gücü:

%75 debide sabit hızlı %83 güç harcar.

%75 debide değişken hızlı %50 güç harcar.

%50 debide enerji tasarrufu: $(0,6-0,18) = 0,42$

$$E_{gl} = 6 \times \frac{112kW \times 0,42 \times 2190h/yıl}{0,92} = 671,853 \text{ kWh/yıl}$$

%75 debide enerji tasarrufu = (0,83-0,5) = 0,33

$$E_{g2} = 6 \times \frac{112\text{kW} \times 0,33 \times 2912\text{h/yıl}}{0,92} = 701,919 \text{ kWh/yıl}$$

Toplam tasarruf edilen enerji: $E_{gt} = E_{g1} + E_{g2} = 1373772 \text{ kWh/yıl}$

Tutarı: $S = 450 \times E_{gt} = 618197400 \text{ TL/yıl}$

Yapılacak yatırımın üst sınırı:

K: %80, n: 10 yıl, Ortalama enerji maliyeti: 1000 TL

$$Y = S \cdot \left| \frac{(1-K)^n - 1}{(1-K)^n \cdot K} \right| = S \cdot 1,25 = 1,373,772,000 \cdot 1,25$$

$Y = 1.717.215.000 \text{ TL}$

K: Yıllık banka faizine eşit getiri

n: İşletme ömrü (değerlendirme süresi)

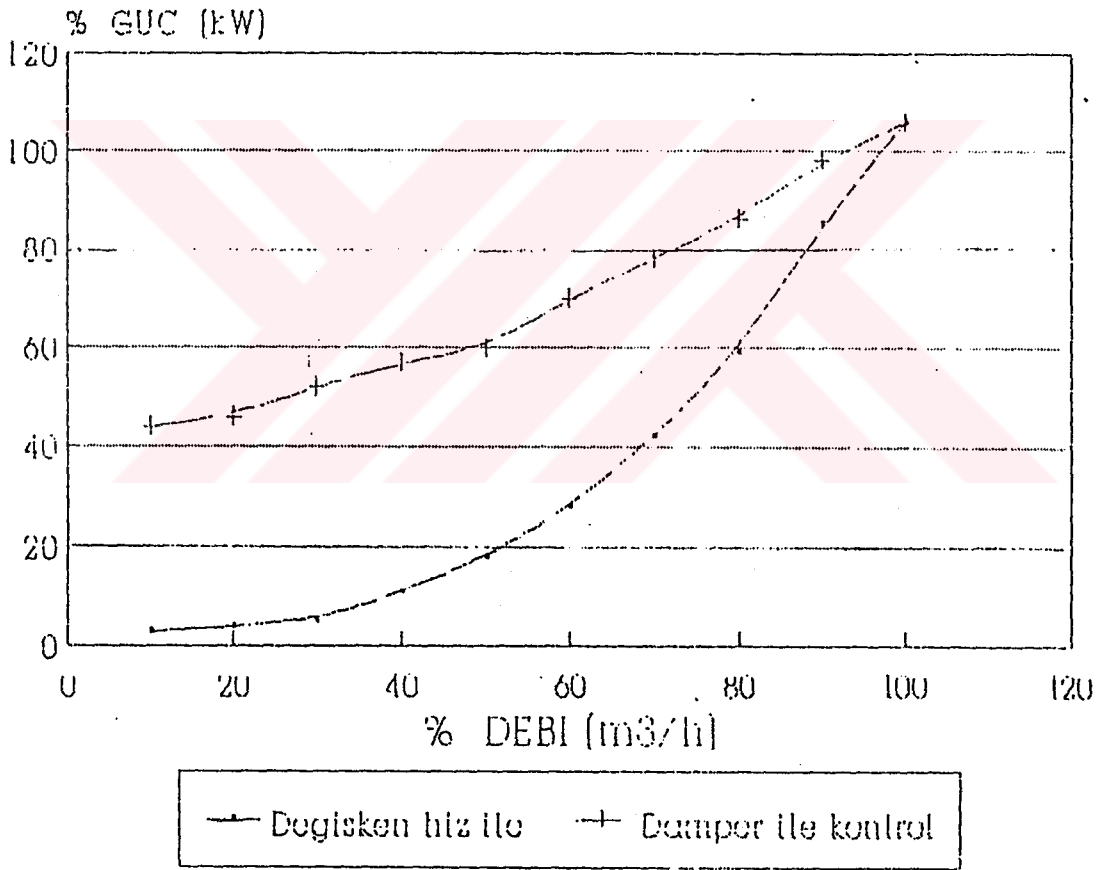
Ortalama enerji maliyeti: Değerlendirme süresi boyunca enerjinin ortalama maliyeti.

5.3.2. SLAB Fırını Yanma Havası Fanı

Sıcak haddehanede bulunan slab fırınlarındaki ısı seviyesi haddelenecek ürünlerin cinsine bağlı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak yakıt ve yakma havasının miktarı da değişmektedir. Fanın sabit hızlı motorla tahrikinde, yakma havası miktarı damper ile ayarlanmaktadır. Düşük debili çalışmada, damperin belli bir miktar kapatılması, sistem basıncını arttıracığından, debinin düşmesiyle birlikte gerekli motor gücü aynı oranda azalmaz. Bu güç bağıntısı (3.1) de açıkça görülmektedir.

Düşük debili çalışmalarda, gereksiz olarak harcanan bu enerjinin tasarrufu için yanma havası miktarını Bölüm (2.7)'de anlatılan hız kontrol ünitesi kullanarak ayarlayabiliriz. Bu durumda, sistemdeki damper kalkacağından, bunun sebep olduğu kayıplarda ortadan kalkacaktır.

Slab fırını hava fanı 150 kW'lık bir asenkron motorla tahrik edilmektedir. Bu motorun sağlaması gereken güç miktarları debiye bağlı olarak, Şekil 5.2'deki gibidir. Basılan hava miktarı ısıtılan slablardan levha veya şerit haddelenmesine bağlı olarak değişir.



Şekil 5.2. Fan güç debi/güç değişim eğrileri.

Slab fırınının çalışması, üç devreli olarak gerçekleştirilmektedir. Isıtmaya başlama ve 800°C de slabların ısıtılması: Haddelenmeye geçmeden önce fırın sıcaklığı 800°C den 1280°C ye çıkarılır. Diğer bir devresi ise, fırının hazırlanmasıdır. Bu üç devrede yanma havasını sağlayan fan, değişik debilerde çalışır. Bu çalışma yükleri ve süreleri aylık olarak aşağıda verilmiştir. Fırın çalışma süreleri şerit haddeleme ve levha haddelirmede değişiklik olmaktadır. Aylık ortalama olarak slab ısıtma şerit haddeleme ve levha haddeleme süreleri yaklaşık olarak aşağıda verilmiştir.

Şerit haddelirmede: Fan çalışma süreleri;

%95 debide 83 saat/ay

%50 debide 29 saat/ay

Slab ısıtmada; %30 debide 476 saat/ay

Levha haddelirmede fan çalışma süreleri;

%95 debide 95 saat/ay

%50 debide 37 saat/ay

Gerekli motor gücünün, debiye göre değişimi;

%95 debide sabit hızlı - %100 güç

%95 debide değişken hızlı - %92 güç

%50 debide: sabit hızlı - %60 güç

%50 debide: değişken hızlı - %18 güç

%30 debide: sabit hızlıda - %52

%30 debide: değişken hızlıda - %5

Kontrol sistemi - motor verimi : %92

Enerji Tasarrufu:

Şerit haddelirmede:

$$E_{g1} = 150 \text{ kW} \times [(0,60 - 0,18) \times 29 \text{ h/ay} + (1 - 0,92) \times 83 \text{ h/ay}] \times 12 = 33852 \text{ kWh/yıl}$$

Levha haddedelemde:

$$E_{g2} = 150 \text{ kW} \times [(0,60 - 0,18) \times 37 \text{ h/ay} + (1 - 0,92) \times 95] \times 12 = 41680 \text{ kWh/yıl}$$

Slab ısıtmada;

$$E_{g3} = 150 \text{ kW} \times [(0,52 - 0,05) \times 476 \text{ h/ay}] \times 12 = 402700 \text{ kWh/yıl}$$

Toplam enerji tasarrufu:

$$E_{gT} = \frac{478232}{0,92} \text{ kWh/yıl} = 519817 \text{ kWh/yıl}$$

Enerji maliyeti: 450 TL/kWh

Tasarrufun parasal değeri $S = 450 \times 519817 = 233.917.650$ TL/yıl

Yıllık banka faizi %80 alınarak. On yıllık bir değerlendirme süresi için yapılabilecek yatırım miktarı:

K: %80, n=10 yıl,

Değerlendirme süresi içinde enerjinin ortalama maliyeti: 1000 TL/kWh

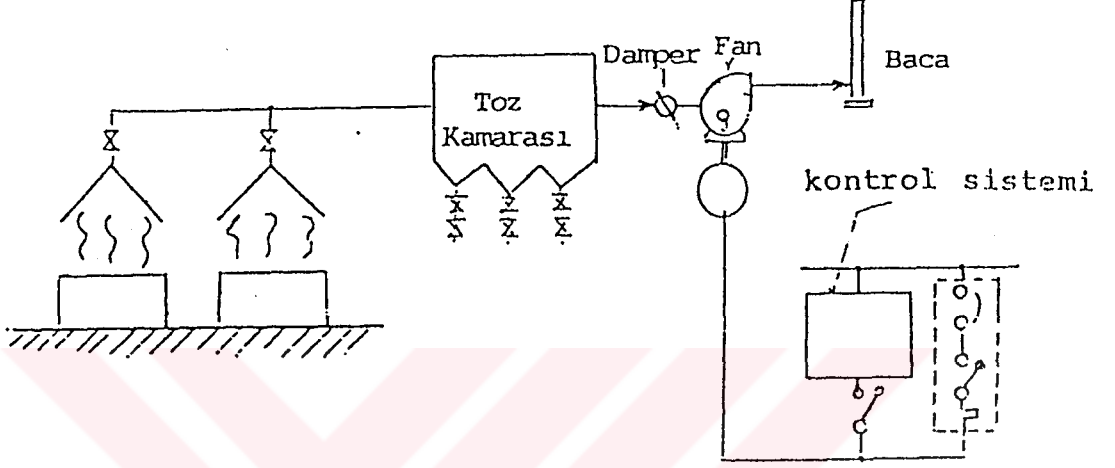
$$S = E_{gT} \times 100 = 519.817.000 \text{ TL}$$

$$Y = S \cdot \left| \frac{(1-0,8)^{10} - 1}{(1-8,8)^{10} \cdot 0,8} \right| = S \cdot 1,25 = 649.771.250 \text{ TL}$$

5.3.3. Kireç Fabrikası Toz Toplama Fanı

Çimento ve kireç fabrikalarında kullanılan ekzost fanlarının kontrolü, damper ile yapılması durumunda, toz olmadığı hallerde, önceki örnekte anlattığımız nedenlerden dolayı, motor nominal yüke yakın bir yükte çalışıyormuş gibi şebekeden akım çekecektir. Bu da, gereksiz enerji harcanması anlamına gelmektedir. Hız kontrol sistemi kurulması, bu enerjiyi tasarruf etmemizi sağlar.

Aşağıdaki şekillerde, işletme diyagramı ve çalışma debisi, günün saatlerine göre verilmiş olan III. kireç fabrikası toz toplama fanında, değişken hızlı tahrik kullanılması durumunda büyük miktarda enerji tasarruf edilir. Fan karakteristik eğrileri 1. örnektekinin aynıdır. Fan 90kW gücünde bir motorla tahrik edilmektedir.



Şekil 5.4. Kireç fabrikası toz toplama sistemi.

Şekil 5.2'deki fan güç/debi eğrilerinden

Fan %70 debide 4004 saat/yıl

%40 debide 4732 saat/yıl çalışmaktadır.

Motorun şebekeden çektiği güç (%);

%70 debide damper kontrollü %78

%70 debide değişken hızlı %43

%40 debide damper kontrollü %57

%40 debide değişken hızlı %10

Kontrol sistemi-motor verimi: %92

Tasarruf edilen enerji:

%70 debide tasarruf edilen enerji $(0,78-0,43)=0,35$

$$E_{g1} = \frac{90\text{kW} \times 0,35 \times 4004}{0,92} = 137.093 \text{ kWh/yıl}$$

%40 debide tasarruf edilen enerji (0,57-0,10) 0,47

$$E_{g2} = \frac{90kW \times 0,47 \times 4732}{0,92} = 217.569 \text{ kWh/yıl}$$

E_{gT} = Toplam tasarruf edilen enerji : 354.662 kWh/yıl

S = Tutarı = $450 \times 354.662 = 159.597.900$ TL/yıl

Yapılabilecek yatırımın üst sınırı:

$K = \%80$ $n = 10$ yıl Ortalama enerji maliyeti: 1000 TL

$Y = S \cdot 1,25 = 199.497.375$ TL

5.3.4. Su Tesisleri Filtre Suyu Pompaları

Sürekli döküm II ve sıcak haddehanelerde, açık devre soğutma suyu olarak kullanılan sular, bu tesislerden pompalar vasıtasıyla su tesislerine basılmaktadır. Bu kirlenmiş ve sıcaklığı yükselmiş su, su tesislerinde filtre edilip soğutulduktan sonra tekrar kullanıma sunulmak üzere bu tesislere geri gönderilmektedir.

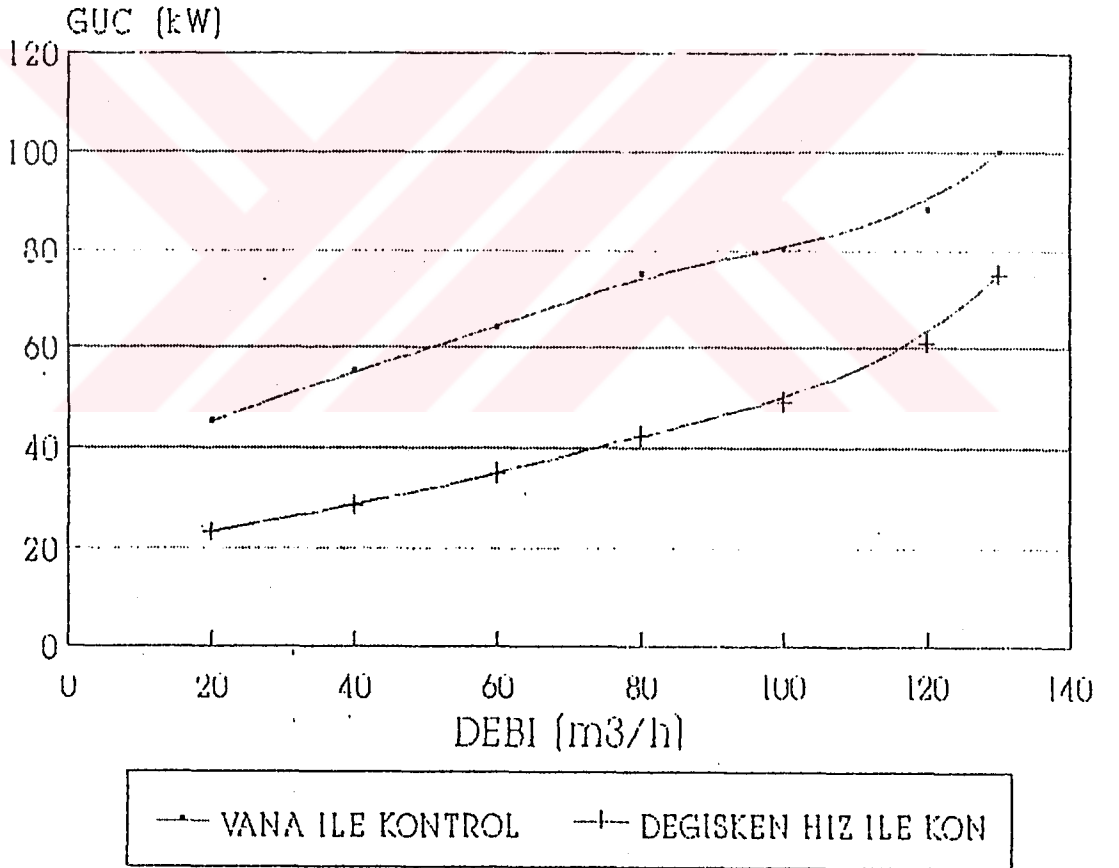
Filtre edilmiş suyu sürekli döküm ve sıcak haddehaneye basan her biri $4385 \text{ m}^3/\text{h}$ kapasiteli üç adet pompa vardır. Bu pompalardan bir tanesi yedek, diğer iki tanesi ihtiyaca göre çalıştırılmaktadır.

1991 yılının 11 aylık ortalaması alındığında pompaların bastığı su ortalama $4883 \text{ m}^3/\text{h}$ 'dir. İşletmenin ihtiyacı olan su miktarı çok seyrek olarak iki pompa kapasitesine ulaşmaktadır. Bu durumda iki pompanın birlikte çalışması, yüksek debiden dolayı basıncı arttırmaktadır. Fazla gelen akış miktarı tekrar emiş kuyusuna bir dolaşım sistemi (by-pass) ile döndürülmektedir.

Bu pompaları tahrik etmekte olan 1100 kW.2,4 kv asenkron motorlar göz önüne alınırsa, harcanan enerjinin hangi boyutta olduğu daha iyi anlaşılır. Ayrıca 1991

yılında yapılmış olan kayıtlar incelendiğinde, geçen bu sürenin sadece %10 gibi bir kısmında tek pompa çalışmıştır.

Bütün bu verilere göre sürekli iki pompa çalışmakta ve borulardaki basınca göre otomatik açılan by-pass vanası, basılan suyun yanısıra yakın bir kısmını geriye göndermektedir. Buna göre pompa motorlarına hız kontrol sistemi bağlanması durumunda; önemli bir enerji tasarrufu sağlar.



Şekil 5.5. Pompa güç/debi eğrileri.

İki pompa çalışma süresi: 7862 h/yıl

İki pompa toplam kapasitesi: $Q=8770 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=60 \text{ m}$.

İşletme ortalama ihtiyacı: Q 4883 m³/h, H 40 m.
Pompalama sistemi %56 kapasite ile çalışmaktadır.

Hız ayarı ile debi kontrolünde sağlanacak enerji tasarrufu; gerekli motor gücü;

%56 debide vana kontrollu - %63

%56 debide değişken hızlı - %34

Tasarruf edilen enerji: $0,63 - 0,34 = 0,29$

$$E_g = \frac{2 \times 1100 \text{ kW} \times 7862 \text{ h/yıl} \times 0,29}{0,92} = 5.452.126 \text{ kWh/yıl}$$

$$S = 450 \times 5.452.126 = 2.453.456.739 \text{ TL/yıl}$$

Yapılacak yatırımın üst sınırı;

$K=0,80$ $n = 10$ yıl Ortalama enerji fiyatı: 1000 TL/kWh

$$Y = S \cdot \left| \frac{(1-K)^n - 1}{(1-K)^n \cdot K} \right|$$

$$Y = 5.452.126.000 \times 1,25 = 6.815.157.500 \text{ TL}$$

BÖLÜM 6.

SONUÇ

Bu çalışmada asenkron motorun devir hızının kontrol edilmesiyle, bu motorun tahrik ettiği pompa fan, sıkıştırıcı gibi iş makinalarında akışkan kontrolu anlatıldı.

Bu kontrol yapılırken sistemin giriş büyüklüğü hız, kontrol edilerek, çıkış büyüklüğü olan debi, basınç, güç kontrol edilmektedir. Hız ayarı ise, akım ara devreli veya gerilim ara devreli eviricilerle değişik kontrol yöntemleri ile yapılmaktadır. Güç kapasiteleri arttırılmış olan kapıdan kesime götürülen tristörler bu alanda büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bunlar sayesinde komutasyon çok daha kolay yapılmaktadır ve kontrol devreleri daha basitleşmiştir.

Devir hızı ayarı ile akışkan kontrolu yapmak, fan yasaları denilen hız, basınç, debi ve güç arasındaki bağıntılarla açıklanabilir. Şöyle ki;

$$\frac{n}{n_1} = \frac{Q}{Q_1} , \quad \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 = \frac{H}{H_1} , \quad \left(\frac{n}{n_1}\right)^3 = \frac{P}{P_1}$$

n=hız Q=debi H=düşü(basınç) P=güç

Bu bağıntılardan görüleceği gibi pompa veya fan çıkışında elde edilecek basınç, debi ve motorun sağlaması gereken güç, motor dönüş hızına bağlı değişmektedir.

Düşük debili çalışmada, sistemin direç eğrisine bağlı olarak devir sayısı değiştirilerek, şebekeden çekilen güç azaltılabilir. Şöyle ki; eğer sistem, dinamik basınçlı bir sistem ise değişken hız ile akışkan

kontrolünde büyük miktarlarda enerji tasarrufu yapılabilir. Güç bağıntısına bakılırsa güç, debi ve basınç çarpımına orantılıdır.

$$P_m \sim Q.P$$

Statik basınçlı sistemde basınç sabittir. Bu durumda, düşük debili çalışmada gerekli güç, debi oranında azalır.

$$P_m \sim Q, \quad P = \text{sabit}$$

Dinamik basınçlı sistemde ise basınç, debiye bağlı olarak değişeceğinden düşük debili çalışmada gerekli güç, debideki azalmanın küpü oranında azalır. Buna karşılık yaygın olarak kullanılan akışkan kontrol yöntemleri, akışkanın aktığı kesiti daralttığı için debi azalırken basınç artar. Böylece gerekli güçte önemli bir azalma olmaz.

Hız ayarı ile akışkan kontrolünün dinamik basınç oranı büyük olan sistemlerde yapılması daha uygundur. Ayrıca bu sistemlerin düşük debide uzun süre çalışan sistemler olması gerekir.

Yeni kurulan veya çalışmakta olan akışkan tahrik sistemlerinde, hız kontrol ünitesi kullanılması büyük bir yatırım gerektirmektedir. Bunun için yapılacak yatırım ve sağlayacağı faydanın ekonomik olarak değerlendirilmesi gerekir. Bu değerlendirmeyi yapmak için işletme şartlarının kullanılacak ekipmanın ve sistemin teknik özelliklerinin bilinmesi gerekir.

Basit olarak, sistemin sağlayacağı yıllık tasarruf ile kendini ne kadar sürede geri ödediğine bakılarak, yatırımın uygun olup olmadığı anlaşılabılır. Fakat bu yöntemde paranın zaman değeri hesaba katılmadığından daha doğru bir hesaplama yapılabilir. Bu hesaplamada yıllık banka faizi, yatırımın getirmesi gereken en az yıllık

kazanç olarak alınarak yıllık tasarruf belirlendikten sonra kurulacak sistemin işletme ömrü için yapılabilecek en büyük yatırım hesaplanabilir. Bu değer, sistem maliyeti ile karşılaştırılarak yatırımın uygun olup olmadığına karar verilebilir.

Erdemir akışkan tahrik sistemlerinin çok yaygın olarak bulunduğu bir tesistir. Burada yapılan araştırmada çeşitli güçlerde hız kontrolü ile akışkan kontrolü yapmaya uygun bir çok pompa ve fan uygulamasına rastlanmıştır.

Örnek uygulamalar bölümünde verilen, bunlardan yalnızca bir kaçıdır. Verilen örneklerden de görüleceği gibi önerilen sistemin uygulanması halinde çok büyük enerji tasarrufları söz konusudur.

Bunun gibi sanayi tesislerinde böyle bir uygulamaya gidilmesi, büyük kar sağlanmasının yanında dünyada gittikçe azalmakta olan enerji kaynaklarının etkin kullanılmasına katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] HICKOK, H.N., "Adjustable speed-A tool for saving energy losses in pumps, fans, blowers and compressors" in 1983 Petroleum and Chemical Industry Tech.Conf. Rec.Denver, Co.pp.251-264.
- [2] BOSE, B.K., Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, New-Jersey-1986.
- [3] HICKOK, H.N., WICKISER, M.R., "The Gate-turn-off thyristor-A break through for the retrofit of existing induction motors from fixed to adjustable speed", General Electric Company, Salem Virginia.
- [4] ÇETİN, İ., SCHUISKY, W., "Elektrik Motörleri", 1. Kısım, Fatih Yayınevi, 1987.
- [5] ARMINTOR, J.K., and CONNORS, D.P., "Pumping applications in the petroleum and Chemical Industries" in 1985, Petroleum and Chemical Industry Tech. Conf.Rec.Huston TX. pp.43-50.
- [6] RISE, DAVID E., "A Suggested Energy-Saving Evaluation Method for AC Adjustable-Speed Drive Application", IEEE Trans.Ind.Appl.Vol.24, No.6, pp.1107-1117 Nov./Dec.1986.
- [7] DE GARM, E.PAUL, CANADA, JOHN R., SULLIVAN, WILLIAM, G. SULLIVAN, Engineering Economy, Mc Millian, Publishing Co.Inc. New York, 1979.
- [8] MURRAY R. SPIEGEL, "Advanced Calculas" Mc Graw-Hill, International Book Company, New York, 1974.

ÖZGEÇMİŞ

İsmail Kartal 1962'de Gümüşhane'de doğdu. İlk ve Orta okulu burada tamamladı. 1982'de İstanbul Gültepe End.Mes.Lisesi Elektrik bölümünden mezun oldu. Çeşitli işyerlerinde teknisyen olarak çalıştıktan sonra 1984 yılında İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1988 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. Halen iki yıldır Ereğli Demir ve Çelik Fabrikalarında elektrik mühendisi olarak çalışmaktadır. Yazar İngilizce bilmektedir.