

35124

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASAMAKLI GERİLİM DALGALARININ SİNCAP KAFESLİ MOTOR

MOMENTİNE YAPTIĞI ETKİLERİN İNCELENMESİ

39129

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Majid MOHADDES

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 OCAK 1993

Tezin Savunulduğu Tarih : 9 ŞUBAT 1993

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Faik MERGEN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr . İlhami ÇETİN

: Prof.Dr . Nurdan GÜZELBEYOĞLU

ŞUBAT 1993

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanıp ortaya çıkmasında kıymetli görüşleriyle bana her zaman yardımcı olan sayın hocam Prof. Dr. FAİK MERGEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

OCAK 1993
İSTANBUL

Majid Mohaddes

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	(ii)
İÇİNDEKİLER	(iii)
NOTASYON LİSTESİ	(v)
ÖZET	(vii)
SUMMARY	(viii)
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1 Evirici Çıkışları Üzerinde Yapılan Araştırmalar	1
1.2 Tez'de Yapılan Çalışmalar	3
1.3 Evirici çıkışları	4
BÖLÜM 2. HARMONİK ANALİZİ	8
2.1 Basamaklı Dalganın En Genel Halde Analizi	10
2.2 Basamak Genişlikleri Birbirine Eşit, Genlikleri İse Birbirinden Farklı olan Basamaklı Dalganın Analizi.....	11
2.3 Basamak Genlikleri Eşit, Genişlikleri Farklı Olan Basamaklı Dalganın Analizi	12
2.4 Basamak Genişlikleri Ve Genlikleri Birbirine Eşit Olan Dalganın Analizi..	13
BÖLÜM 3 EVİRİCİ BESLEMELİ ASENKRON MOTORUN ZAMAN HARMONİKLERİ	15
3.1 Asenkron Makinanın Temel Eşdeğer devresi	17
3.2 Zaman Harmoniklerinin Eşdeğer Devresi.	18
3.3 Harmonik momenti, Akımı ve Harmonik Kayıpları	21
3.4 Hesaplamalarda Kullanılan Metod	23
3.5 Harmonik momentleri Etkisinin kullanımı	27
3.5.1 Harmonik momentleri	29
3.5.2 Harmonik Momentlerinin Zaman ile Değişimi	40

3.6	Harmonik akımları	45
3.7	İki Makinanın Çıkış Momentlerinin Eşitlenmesi için Eşdeğer devre Parametrelerinin Değişimi	52
BÖLÜM 4. SONUÇLAR		57
KAYNAKLAR		61
EKA. YAZILAN BİLGİSAYAR PROGRAMLARI.....		63
ÖZGEÇMİŞ		77



NOTASYON LİSTESİ

b	: Sargı Genişliği
b_o	: Oluk Genişliği
E_2	: Yükte Çalışmada Rotor Sargısında Endüklenen Gerilim
E_{2o}	: Rotoru Bloke Edilmiş Asenkron Makinasının rotor Sargısında Endüklenen Gerilim
E_{2o}'	: E_{2o} 'ın Stator Tarafına İndirgenmiş Değeri
f_1	: Şebeke Frekansı
f_2	: Rotor Sargı Akımlarının Frekansı
h	: Oluk Yüksekliği
I_2	: Rotor Devresinin Akımı
I_2'	: Rotor Akımının Statora İndirgenmiş Değeri
I_n	: n 'inci Harmoniğin Şebekeden Çektiği Akım
I_{2n}	: İki Basamaklı Gerilimin Makinada Meydana Getirdiği n 'inci mertebeden Harmonik akımı
I_{4n}	: Üç Basamaklı Gerilimin Makinada Meydana Getirdiği n 'inci mertebeden Harmonik akımı
I_{4n}	: Dört Basamaklı Gerilimin Makinada Meydana Getirdiği n 'inci mertebeden Harmonik akımı
K_r	: Deri Etkisinden Dolayı R_2 Direncini Arttıran Faktör
K_x	: Deri Etkisinden Dolayı X_2 Reaktansını Azaltan Faktör
m	: Basamak Sayısı
M_n	: n 'inci harmonik Geriliminin Makinada Ürettiği Moment
M_{2n}	: İki Basamaklı Dalgaının Makinada Ürettiği n 'inci Harmonik Momenti
M_{3n}	: Üç Basamaklı Dalgaının Makinada Ürettiği n 'inci Harmonik Momenti
M_{4n}	: Dört Basamaklı Dalgaının Makinada Ürettiği n 'inci Harmonik Momenti
P_v	: Basamak genişliği
$P_{n, cu}$	: n 'inci Harmoniğin Bakır Kaybı
R_1	: Stator Devresinin Direnci
R_2	: Rotor Devresinin Direnci

R_2	: Statora indirgenmiş Rotor Direnci
s	: Asenkron Makinasının Kayması
s_n	: n'inci Harmoniğin kayması
$\bar{u}$	: Gerilim Değiştirme Oranı
V_b	: Basamak Gerilimi
V_n	: n'inci Harmonik Geriliminin Genliği
$V_{m, \max}$	: m Basamaklı Gerilimin Maksimum değeri
$V_{2, \max}$	: 2 Basamaklı Gerilimin Maksimum değeri
$V_{3, \max}$	: 3 Basamaklı Gerilimin Maksimum değeri
$V_{4, \max}$	: 4 Basamaklı Gerilimin Maksimum değeri
V_{nm}	: m Basamaklı Dalganın n'inci Mertebeden Harmonik Geriliminin Efektif Değeri
V_{n2}	: İki Basamaklı Dalganın n'inci Mertebeden Harmonik Geriliminin Efektif Değeri
V_{n3}	: Üç Basamaklı Dalganın n'inci Mertebeden Harmonik Geriliminin Efektif Değeri
V_{n4}	: Dört Basamaklı Dalganın n'inci Mertebeden Harmonik Geriliminin Efektif Değeri
X_1	: Stator Devresinin Reaktansı
X_2	: Rotor Devresinin Reaktansı
X_2'	: Statora indirgenmiş Rotor Reaktansı
X_m	: Manyetislenme Reaktansı
Z_2	: Rotor Devresinin Empedansı
ε	: Eşdeğer İletken Yüksekliği
ρ	: Sargı Malzemesinin Özgül Direnci
ϕ_n	: n'inci Harmoniğin Nispi Açısal Frekansı
θ_m	: m'inci Basamağın Başlangıç Tetikleme Açısı
θ	: İlk Basamağın Başlangıç Tetikleme Açısı
ω	: Açısal hız

ÖZET

Bu çalışmada, basamaklı gerilim dalgalarının asenkron makinasında meydana getirdikleri harmonik momentleri ve harmonik akımlarının, toplam moment ve toplam akım üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Harmonik momentleri, basamakların başlangıçlarını belirleyen θ_k açılarından etkilenmektedir. Amaç toplam harmonik momentlerinin en etkin olduğu θ açılarını bulmak ve toplam moment üzerinde meydana getirdiği değişim aralıklarını belirlemektir.

Bu çalışmanın 1'inci bölümünde eviricilerden kısaca söz edilmiştir. Çalışmanın 2'inci bölümünde ise basamaklı çıkışın en genel halde ve bazı özel durumları için fourier analizi yapılarak harmonik ifadeleri bulunmuştur. Tezin üçüncü bölümünde elde edilen zaman harmoniklerinin eşdeğer devreleri ve 2, 3 ve 4 basamaklı gerilim dalgaları motor terminallerine uygulanarak meydana getirdikleri harmonik moment ve akımları bulunmuştur. Bölüm 2 de ayrıca farklı firmalar tarafından üretilen ve aynı güçte olan iki asenkron motor gözönüne alınmıştır. Seçilen asenkron motorlar aynı güç, gerilim, frekans ve kutup sayısına sahip olmalarına rağmen, aynı kayma değerlerinde farklı momentler üretmektedirler. Bu iki makinanın çalışma şartlarının (moment ve kayma) eşitliği için harmonik momentlerinin etkileri kullanılmıştır. Fakat harmonik momentlerinin en etkin olduğu θ_k tetikleme açılarında bile bu eşitlik sağlanamamıştır. Tezin en son bölümünde iki makinanın çıkış momentlerinin birbirine eşitlenmesi için, çıkış momenti daha yüksek olan makinanın eşdeğer devrsindeki elemanlarının kayma ile değişimi ve bu değişim sırasında makinanın verimi ve güç katsayıları bulunmuştur.

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF EFFECTS OF STEPPED-VOLTAGE WAVES UPON TORQUES OF A SQUIRREL CAGE MOTOR

The performance of induction motor when subjected to a nonsinusoidal voltage waveform has been analysed by many authors. It has been found that the destructive effects of the time harmonics reduces the efficiency of the drive system due to increased additional losses. Many authors have worked on the construction of waveforms and inverter electronics to eliminate the low order harmonics which cannot be filtered by the machine impedance. These works have become successful and found practical applications.

Since the semiconductors work as a switch, the output of an inverter circuit is nonsinusoidal and generates harmonics. There are basically two methods to eliminate harmonics:

1. Pulse width modulation
2. Pulse amplitude modulation

The first has been studied by many authors and found widely practical applications. Some of these studies are as follows.

Analytical and experimental investigation on steady state and transient behaviour of an induction motor fed from nonsinusoidal power supplies is presented in [1]. The analytical investigations are based on a direct three phase model developed for this purpose. Simulation procedure for computing the exact nature obtained from a pulse with modulated (PWM) inverter is described. Transient studies exhibiting the effects of specific PWM pattern changing on the induction motors are outlined.

In reference [2], traditional PWM ac motor drives perform well over a large speed range and have many positive features demonstrated with their simplicity. However, the waveforms used are significantly less than ideal at high modulation depths and low switching rates, especially with regard to harmonically induced motor losses. An improved strategy for digitally producing PWM based on conventional triangulation methods are presented. A new technique for reducing the

harmonic losses resulting from sinusoidal PWM waveform analysed in depth and realised on a 40 KVA inverter. Tests with this inverter on 7.5 KW and 15 KW motors confirm that the inverter's performance is significantly enhanced for certain operating conditions, without any sacrifice.

In reference [3], PWM voltage waveforms are analysed for a motor drive application. The switching patterns are developed in three - phase bridge inverter. The approach is based upon the minimising the harmonic content of the current flowing into the motor.

PWM waveforms were analysed to obtain loss-optimal PWM waveforms for variable speed induction motor drives. PWM waveforms were induced differently and novel waveforms were demonstrated. Effects of supply voltage waveforms on iron losses were examined in an induction motor in reference [4] and [5].

In reference [6] the harmonic torques in an induction motor which is fed from PWM inverter are computed for an unsaturated operation. Their effects on the fundamental harmonic are used to obtain preselected drive conditions given for a different motor. The equivalent circuit of an induction motor is considered for time harmonics and subjected to 2, 4 and 8 PWM voltage waves of equal pulse duration. The induction motors selected having same rating but manufactured by different companies, are supplied by PWM waves, have produced different torques and slips. It is shown that the equality of drive parameters (torque and slip) can be obtained by properly selecting the PWM voltage waveform even if the motors are not identical. As a result of this analysis the functions of the equivalent circuit parameters in terms of pulse-width are obtained for given torque and slip. The analysis is proved that an inverter driven induction motor replaced by a spare motor will certainly necessitate to alter the drive condition. The curve of the torque-slip of two different motor are approached one another and in order to avoid such changes to maintain the previous torque and slip values as they were, either the supply waveform or the equivalent circuit parameters must necessarily have new values.

In reference [7], the second type of modulation is taken into consideration. The optimisation of harmonic distortion in the output waveform of stepped-wave inverter circuits is investigated. However, it is impossible to obtain a sinusoidal waveform without any output filter, because the silicon devices act as switching elements. It is shown that the harmonic distortion of step waves, which can be performed by square pulses, remain in lower ranges as compared to output waves of other forms. It is observed that the

theoretically achieved step waveform contains very low harmonic distortion in comparison with other waveforms which are proposed for inverter output. For example the total harmonic distortion of a six step wave is approximately 8% and the lowest existing harmonic is the thirteenth. However, the total harmonic distortion of a pulse width modulated waveform with six pulses per half cycle is in the range of 25% .

In [8], A new method of synthesizing stepped current waveform with $(12n+1)$ th harmonic components is proposed. Suitable cascaded inverter configuration and commutation scheme are developed. Such a system requires a Y-Y transformer of 0-3 times the motor power (kVA) rating. A new scheme of cascaded current source inverters of conventional and PWM type has been developed to eliminate lower order line current harmonics in an induction machine drive system. A suitable commutation scheme has been chosen and analysed. The proposed scheme has $(12n+1)$ th harmonics and reduced size transformer.

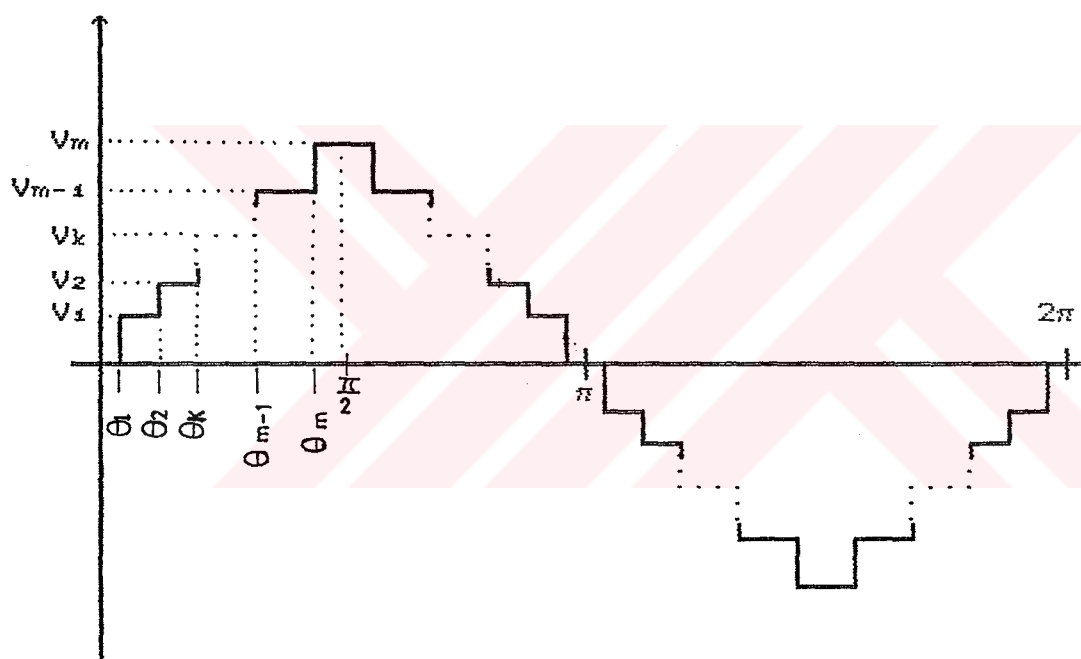
In reference [9], A number of voltage-control schemes in 3-phase bridge inverters are investigated. These control schemes are applied to dual 3-phase cascaded bridge inverters with fifth- and seventh-harmonic neutralization to realize pulse-width and amplitude controlled waveforms. kVA ratings of filter component are calculated to realize a total harmonic distortion of 5% in the output waveform. The control scheme with two pulses per half cycle spaced 60° apart in individual inverters gives the lowest total harmonic distortion and requires the lowest filter kVA rating. The theoretical results are experimentally verified and are in close agreement. Four control schemes have been presented for stepped-wave inverters with dual 3-phase bridge inverters connected in cascade using harmonic neutralization for fifth and seventh harmonics.

A multistage pulse-width modulation system for generating three-phase controlled stepped voltage waveform is taken into consideration in reference [10]. A four stage system is discussed. Voltage control is achieved by pulse-width modulation. Harmonics are eliminated by suitable transformer connection. In the four-stage system the eleventh and thirteenth harmonics predominate in its three-phase output voltage waveform. Both voltage and harmonic controls are incorporated within the inverter.

In reference [11], A DC/AC whose voltage is constructed from discrete low DC sources to form a stepped sine wave-like output is introduced. the criterion of optimal approximation of the stepped waveform to a sine-wave was the minimum mean square error. The internal resistance of the generated source voltage is time

varying since the total series resistance changes with the wave shape. Therefore, even for constant resistive load, the source and the load voltages differ in their shape: the source voltage is of equal step sizes given by the DC sources, and the load voltage is of unequal and decreasing step sizes. The optimal approximation to a sinewave of two voltages will depend on two different switching policies: one adaptive to the source voltage and the other adaptive to the load voltage. The inverter operation for both cases is analysed, and the main harmonic voltage and power, harmonic spectrum distortion are obtained.

In this paper, firstly the following general step waveform is chosen for analysis.



The amplitudes of the steps are chosen as multiples of an unity amplitude and the step duration is equal each other, so that the number of power stages is reduced in practise.

It is known that the Fourier series of a wave consist of only sinusoidal terms of odd harmonics, if the waveform is symmetrical to the origin and to the vertical axes in 90° electrical angle. Assuming this symmetry for the general step waveform, the Fourier series coefficients are derived as function of "m" variables when "m" is equal to the number of steps in the quarter-cycle. These "m" variables are the commutation angles θ_k which define the level changes

in one quarter-cycle of the step wave. For this reason only one quarter-cycle of the wave is considered in the investigation. It is shown that harmonics of the wave can be changed by changing commutation angles θ_k .

In this study the harmonic equivalent circuit and magnitude of harmonic voltage have been formulated by using the methods of harmonic analysis. The inverter and the induction motor are considered as a system. It is well known that the machine parameters for the same frame size and revolution are different as depending upon the manufacturers. Therefore, the copper losses and iron losses occurred in the machine will have different values for the same frame size. The analyses of system is based on two important variables, current and torque which depend on step duration. The former is vital component because of increasing losses and it is effected strongly by θ_k .

The currents and torques caused by harmonics are calculated individually. The torque and current calculations are made for dominant harmonics, known as 1, 5 and 7 and higher order harmonics are neglected due to low voltage magnitudes and high frequencies which increase the reactances by their harmonic order. The variation of harmonic content of the stepped-wave is achieved by introduction of θ which show the first step starting angle.

In this study two induction motor are considered of same ratings but manufactured by different companies. It is unavoidable that the equivalent circuit parameters would not be equal to each other, but would have almost approximate values to keep up requirements of power, revolution and torque. One of two machines is used for emergency purpose in case of any failure occurs in the main driver fed by a stepped-wave modulating inverter. In case of a failure the first motor is to be replaced by the second to continue the process. After the replacement, if the output waveform of the inverter is not changed to a new waveform, the second motor will not be able to satisfy the same running conditions provided by the first motor. The slip, torque and efficiency would have different values. Some applications which are not sensitive to rpm change would not be influenced by the replacement of the motors. But some applications may require unchanged slip and torque values even if the motor is replaced by its spare. Under these circumstances the readjustment of output waveform of the some inverter types like the PWM inverter would help to matter [6]. The aim is to play with harmonic magnitudes by resetting the positions of steps or switching to a new waveform of different step number. The higher the harmonic magnitude, the larger the harmonic torque is obtained, or opposit.

The fundamental voltage magnitude and total harmonic torque must be unchanged to obtain same running conditions. It is known that the harmonic torques 1, 7 and 13 support each other while 5 and 11 cause braking effects on total. Hence it is understood that, if the torque of the spare motor is larger than that of the main motor at a given slip, the braking effect producing torques are to be supported to reduce the total harmonic torque. If the case is in opposition to that given above, the counter process is used to increase total harmonic torque. In this paper the motors are supplied by 2, 3 and 4 stepped waveforms at a pre selected slip. The alteration of step positions causes harmonic change in voltage and torques. In reference [6], 2, 4 and 8 PWM voltage waveforms are applied to motors and almost 19% change is achieved in total torque when in this study the change in total torque is about 3.1% for spare motor. Thus, it shows that the PWM voltage waveform is more proper than the stepped-wave voltages to provide same running conditions when the motor is replaced with spare one.

Meanwhile, it is shown that the total current is strongly effected by steps of starting angles θ_k and at some angles the change in total current is about 140% for motor A and 70% for motor B. The magnitude of harmonic currents and harmonic torques are not only dependent on step angles but also on the equivalent circuit parameters.

BÖLÜM 1: GİRİŞ

1.1 EVİRİCİ ÇIKIŞLARI ÜZERİNDE YAPILAN ARAŞTIRMALAR

Yarıiletken elemanları anahtar gibi çalıştıklarından bunların kullanıldığı eviricilerde çıkış dalgasının sinüs biçimli olması için darbe modülasyon tekniklerinden yararlanmıştır. Bu tekniklerinden yararlanarak geliştirilen eviriciler bugün başlıca iki grupta, Darbe genişlik ve Darbe genlik modülasyonlu eviriciler olarak toplanabilir.

[1] ve [2] de PWM dalgalarının asenkron motor üzerindeki etkileri ve geçici davranışları dikkate alınmıştır. Harmoniklerin meydana getirdikleri kayıpların azaltılması amacıyla 40 kVA 'lık evirici üzerinde geniş bir çalışma yapılmıştır. PWM eviricisiyle beslenen asenkron makinalarının harmonik kayıplarının azaltılması ve üç fazlı bir köprü eviricisi için yeni bir anahtarlama yöntemi ortaya atılmış ve kaynak geriliminin oluşturduğu demir kayıpları ve bu kayıpları en az düzeye indiren PWM gerilim biçimleri bulunmuştur [3], [4], [5]. Zaman harmoniklerinin eşdeğer devreleri bulunmuş ve seçilen aynı nominal değerlere sahip olan fakat farklı firmalar tarafından üretilen iki asenkron makinanın çıkış momentleri ve çıkış momentlerindeki harmonik etkileri incelenmiştir [6]. Basamaklı dalgalarının harmonik distorsiyonu filtresiz olarak % 15 'e kadar indirilebildiği ve basamaklı dalganın üretilmesi için, $(12n \pm 1)$ harmonikleri içeren, yeni bir metod bulunmuştur [7], [8].

Gerilim kontrollü 3-fazlı köprü eviricinin kontrol şeması verilmiş ve 3-fazlı kaskad eviricisine uygulanarak 15 ve 17'inci harmonikleri yok edilmiştir [9].

Harmonik ve gerilim kontrolu yapılan başka bir çalışmada uygun transformator bağlantılarıyla 11 ve 13 'üncü harmonik gerilimleri yok edilmiştir. Bu çalışmada kaynağın iç direnci basamakların pozisyonundan etkilendiği gösterilmiştir. Bu yüzden sabit bir yük direncinde bile kaynak ve yük gerilimleri biçim açısından farklı olacaktır [10], [11].

Darbe genişlik modülasyonu uygulayarak çıkış distorsiyonu % 40 mertebelerine indirmeyi başarılmıştır ve bir çok araştırmacı tarafından geliştirilen eviricilerde bu yöntemler uygulanmıştır [12], [13]. 1962 de Corey darbe genlik modülasyon yöntemi uygulayarak evirici çıkışında basamak şeklinde bir dalga elde etmiştir. Eşit genişlikli ancak farklı genlikli darbelerin oluşturduğu bu dalganın fourier analizi yapıldığında toplam harmonik distorsiyonu oldukça küçüldüğü görülebilir [14]. 1961 'de Flairty geliştirdiği darbe genlik modülasyonlu eviricide [15] farklı genlikte darbeler elde etmek için her evirici katını değişik değerde doğru gerilim kaynaklarıyla beslemek yerine, bunları aynı kaynaktan besleyip çıkışlarını sinüzoidal bir değişim verecek şekilde transformatörlerle toplamış ve oluşturduğu evirici sisteminin çıkış distorsiyonu % 15 mertebelerinde olmuştur.

Besleme frekansının değiştirilmesi devir sayısı kontrolunda bir gelişme temin etmiş olmasına rağmen, makinanın randımanı artan toplam kayıplardan dolayı azalmaktadır. Makina empedansı tarafından süzülmeyen düşük mertebeli harmonikleri yok etmek için dalga yapısı üzerinde bir çok bilimsel çalışma yapılmıştır. DGM'li dalgalarıyla beslenen asenkron makinada oluşturduğu kayıplar bulunmuş ve histerezis kayıplarının darbe sayısının artışıyla etkilenmediği buna karşın girdap akımlarının oluşturduğu kayıplar hızla artmakta olduğu sonucu elde edilmiştir [16]. Ayrıca makinanın eşdeğer devre parametreleri, verim üzerinde çok önemli bir rol oynamaktadır. kutup sayısı nekadardaha büyük ve makina parametreleri nekadardaha küçük ise daha

az kayıpların oluştuğu tesbit edilmiştir. Makina parametrelerinin toplam kayıp üzerindeki etkilerinden dolayı sadece harmonik eliminyasyonu ile harmonik kayıplarının sıfıra indirilmesi mümkün olmadığı gösterilmiştir [17].

Farklı firmalar tarafından üretilen fakat aynı nominal değerlere sahip olan iki makina gözönüne alındığında, makinaların eşdeğer devre parametreleri birbirinden farklı olacağından makinaların moment-kayma eğrileri birbirinden farklı olacaktır. Kaydırma açıları olarak adlandırılan ve darbelerin pozisyonlanmasını sağlayan açıları değiştirilerek her iki motora uygulanan DGM'li dalgaları sayesinde belirli kayma değerleri arasında ortak çalışma alanları bulunmuştur ve her iki motorun birbiriyle yedeklenmesi için, evirici beslemeli asenkron motorlarına uygulanan dalga şeklinin ayarlanması, zorunlu olduğu gösterilmiştir [6].

1.2 TEZ'DE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tezde basamaklı gerilim dalgalarının, asenkron makinasında meydana getirdikleri, harmonik akımları ve bunların toplam moment üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tezin ikinci bölümünde basamak genlikleri birbirine ve basamak genişlikleri birbirine eşit alınarak, 2, 3 ve 4 basamaklı gerilim dalgalarının fourier analizi yapılarak harmonik gerilimlerinin ifadeleri bulunmuştur.

Tezin üçüncü bölümünde ise elde edilen 2, 3 ve 4 basamaklı çıkışlarının harmonik gerilimleri makina terminallerine uygulanmıştır. Seçilen asenkron motorlar, aynı güç, gerilim, frekans ve kutup sayısına sahip olmasına rağmen farklı firmalar tarafından üretilmiş olduklarından aynı kayma değerlerinde farklı momentler üretmektedirler. Bu bölümde iki motorun yedeklenmesi durumunda, aynı

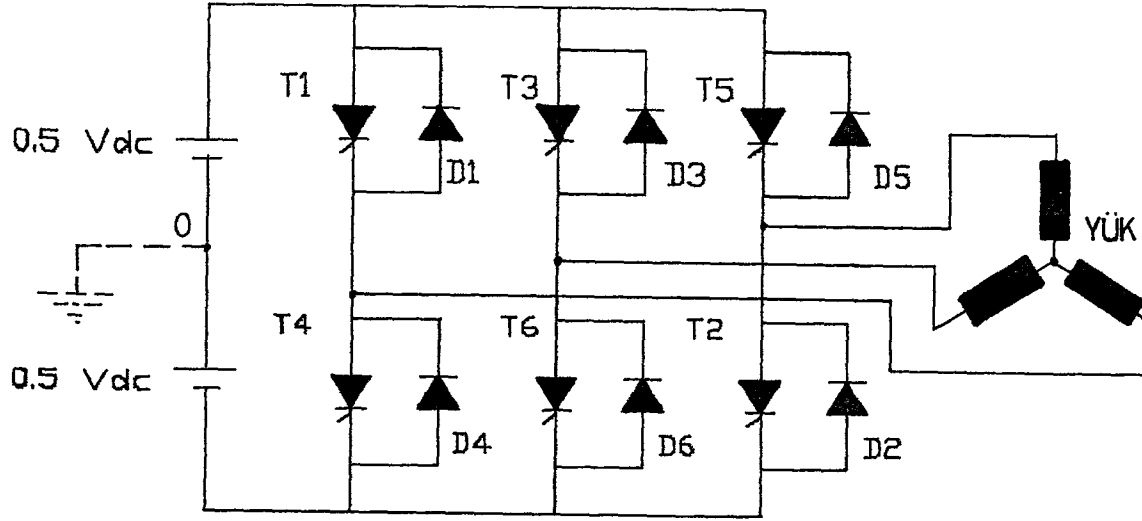
çalışma şartlarının sağlanması için, yedek makinanın terminallerine uygulanan çıkış gerilimin yapısı değiştirilerek, bu şartları sağlayan 0% tetikleme açıları araştırılmıştır. Ayrıca harmonik gerilimlerinin makinalarda meydana getirdikleri harmonik akımları ve harmonik momentleri bulunmuştur. Bununla birlikte harmonik akımları ve harmonik momentlerinin toplam akım ve toplam moment üzerindeki etkileri incelenmiştir.

1.3 EVİRİCİ ÇIKIŞLARI

Yarıiletkenli eviriciler (inverterler) doğru gerilimi alternatif gerilime çeviren statik sistemlerdir. Genellikle alternatif gerilimli güç kaynağı olarak kullanılır. Eviricinin çıkış gerilimi iki şekilde kontrol edilebilir. Bunlardan biri doğrultucunu çıkışını ayarlamak diğeri ise DGM'li dalgada dalga genişliğini, basamaklı dalgada ise basamak genişliğini ayarlamaktır. Eviricilerin kullanılma alanlarından bazıları şunlardır:

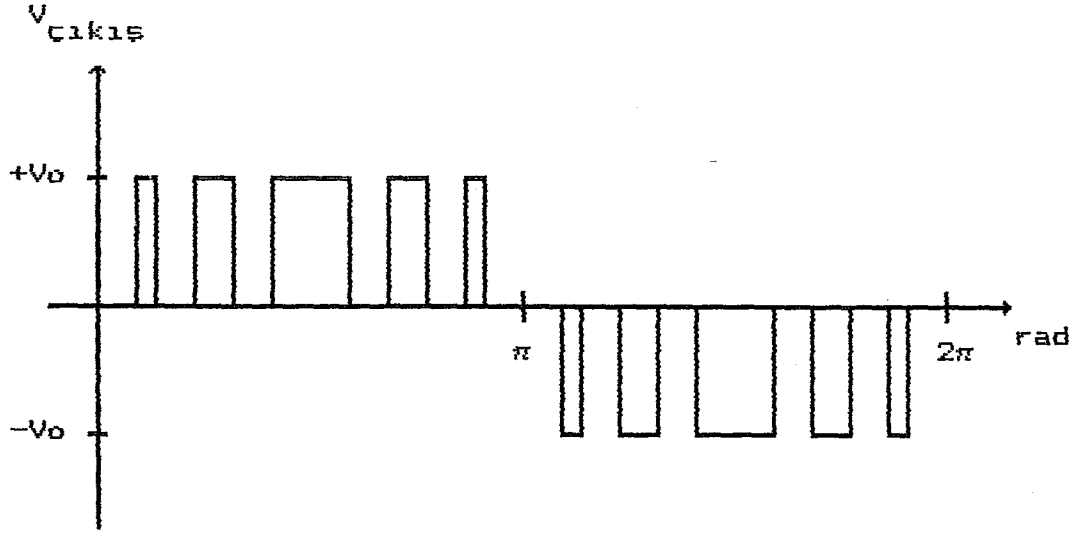
1. Asenkron makinanın hız kontrolü
2. Uçaklardaki ve uydulardaki enerji kaynakları
3. Kesintisiz güç kaynakları
4. Doğru akım enerji hatlarının alternatif akıma dönüştürülmesi
5. Endüksiyonla ısıtmada

Eviricilerin çıkış gerilimi sinüzoidal formda değildir. Bu nedenle çoğu uygulamada gerilim harmonikleri, sistemin davranışı üzerinde oldukça etkili olurlar. Söz konusu bu harmonikler eviricide yapılacak bir takım ilaveler ile azaltılabilir. Ancak bu durum maliyeti aşırı derecede arttırır. Tristör kontrollü, 3-fazlı bir köprü evirici şekil 1.1 de gösterilmiştir.

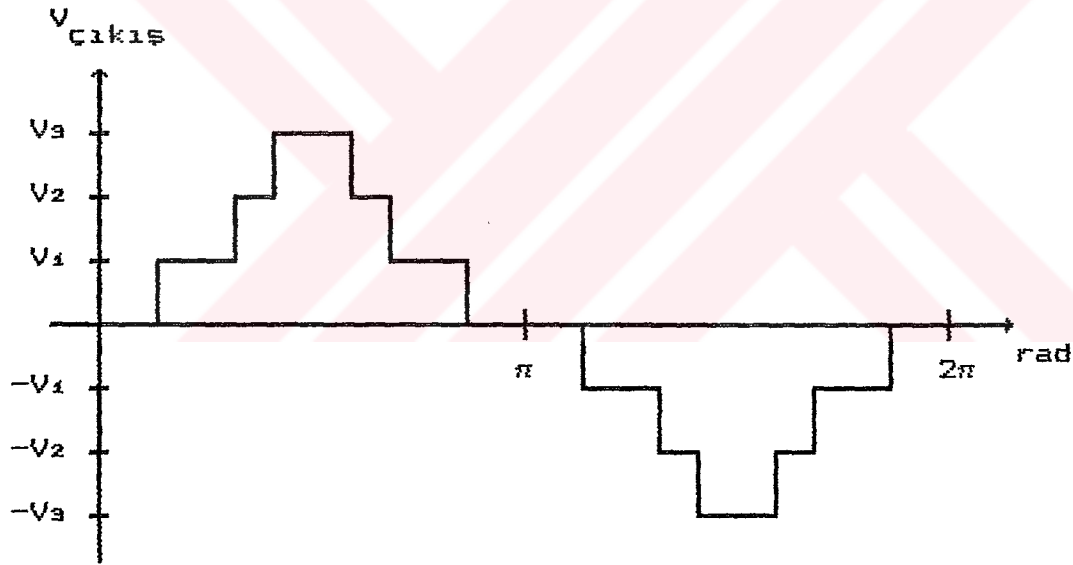


şekil 1.1: 3 fazlı köprü evirici

Besleme kaynağının doğru gerilimi, dalga şeklinin sentezinin uygunluğu için ikiye bölünerek uygulandığı kabul edilmiştir, fakat gerekli değildir. Evirici çıkış gerilimi dalga şekilleri, ateşleme düzeni tarafından belirlenir. Bu dalga şekilleri yüklenme şartlarından etkilenmez. Evirici çıkışındaki dalgalar harmonikler açısından oldukça zengindir, ancak akımlara ait dalga şekilleri, yükün filtre özelliğinden dolayı az çok daha düzgündür. Eviricinin yardımcı diyotları, reaktif güç akışı ve generatör çalışmasında ters akımın akışına izin verir. Alternatif gerilim ile çalışan sistemlerin büyük bir kısmı sinüzoidal bir gerilime ihtiyaç gösterdiklerinden, eviricilerin çıkışındaki dalga şeklinin de sinüzoidal biçime yakın olması istenir. Bu amaçla tutulan yollardan birisi, bir alternans sırasında birden fazla kare darbe üretmek ve bunların genişliklerini şekil 1.2 de görüldüğü gibi uygun şekilde değiştirmektir [13].



şekil 1.2 : Darbe genişlik modülasyonlu bir evirici çıkışı



şekil 1.3: Basamaklı dalga çıkışlı bir evirici çıkışı

Darbe genişlik modülasyonlu gerilim dalgası üreten evirici ile gerilimin harmonik distorsiyonu filtresiz %25'e kadar düşürülebilmektedir. Distorsiyonu azaltmak için tutulan diğer bir yol ise, genişlikleri aynı olan farklı genlikteki darbeleri, basamak şeklinde bir değişim elde edecek biçimde bir araya getirmektir [13]. Böylece çıkışı şekil 1.3 deki gibi değişen eviricilere basamaklı

dalga çıkışlı eviriciler denir. Bu tip eviricilerde toplam harmonik distorsiyonu % 15 gibi daha küçük seviyelere indirgeme olanağı vardır. Ancak genel olarak basamak sayısı kadar evirici katı kullanmak zorunluğu bu evirici tipini son zamanlara kadar ekonomiklik açısından elverişsiz kılmıştır.



BÖLÜM 2: HARMONİK ANALİZİ

Evirici çıkışındaki gerilimler sinüzoidal olmadıklarından harmonik bileşenleri içerir. Herhangi bir periyodik dalga şekli, temel sinüs bileşeni yanında temel bileşen katları olan frekanslarda harmonikler olarak bilinen sinüzoidal bileşenleriyle ve doğru bileşenin, süperpozisyon metodu kullanılarak toplanmasıyla tanımlanabilir. Sinüzoidal olmayan periyodik dalgalar matematiksel olarak

$$v(\omega t) = V_0 + \sum_{n=0}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (2.1)$$

Formülüyle ifade edilebilir. Eğer yukarıdaki formül açık bir şekilde ifade edilirse $v(\omega t)$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$v(\omega t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t + \phi_1) + V_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + \\ + V_3 \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots + V_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (2.2)$$

Burada $\sin(a+b) = \sin(a) \cdot \sin(b) + \cos(a) \cdot \cos(b)$ eşitliğinden yararlanarak (2.2) ifadesi aşağıdaki biçimde de yazılabilir

$$v(\omega t) = V_{dc} + \sum_{n=0}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)] \quad (2.3)$$

veya

$$v(\omega t) = V_{dc} + A_1 \sin(\omega t) + A_2 \sin(2\omega t) + \dots + A_n \sin(n\omega t) \\ + B_1 \cos(\omega t) + B_2 \cos(2\omega t) + \dots + B_n \cos(n\omega t) \quad (2.4)$$

Yukarıdaki eşitlik fourier serisi olarak bilinir ve fourier analizi yardımıyla eşitliğin katsayıları

bulunabilir.

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int v(\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (2.5)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int v(\omega t) \cdot \sin(n\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (2.6)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int v(\omega t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (2.7)$$

Sonuç olarak (2.2) eşitliğinde (2.8) ve (2.9)

$$V_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (2.8)$$

$$\phi_n = \arctan \frac{B_n}{A_n} \quad (2.9)$$

bağıntıları yerleştirildiğinde (2.4) eşitliği elde edilir.
(2.5) eşitliği $v(\omega t)$ 'nin ortalama değeridir.

Verilen herhangi bir periyodik fonksiyonda pozitif ve negatif yarı periyodlardaki alanlar birbirine eşit ise V_{dc} sifıra eşit olacaktır.

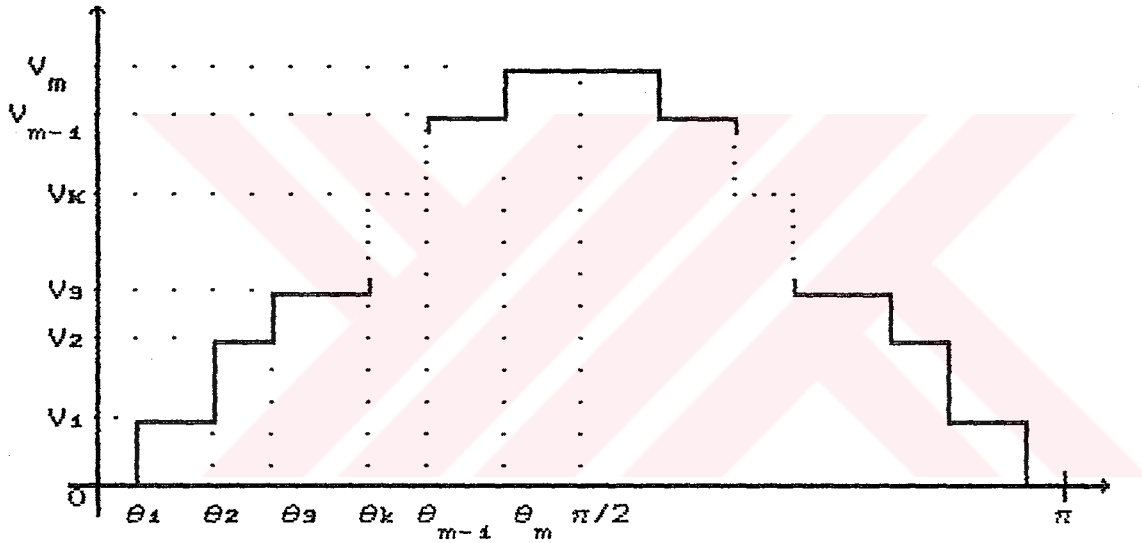
Eğer $f(\omega t + \pi) = -f(\omega t)$ ise çift harmonikler yoktur.

$f(-\omega t) = -f(\omega t)$ ise $B_n = 0$ ve cosinüslü terimler yoktur.

$f(-\omega t) = f(\omega t)$ ise $A_n = 0$ ve sinüslü terimler yoktur.

2.1 BASAMAKLI DALGANIN EN GENEL HALDE ANALİZİ

Basamaklı bir çıkış dalgasında genlik ve genişlikleri, en genel durumda, birbirinden farklı olacaktır. Böyle bir çıkış dalgasını orjine göre noktasal simetrik alıp fourier serisinde sinüslü terimlerin bulunması sağlanabilir. Ayrıca bu dalganın şekil 2.1 deki gibi $\pi/2$ den geçen bir düşey eksene göre simetrisi varsa, sadece tek harmonikler bulunacaktır.



Şekil 2.1: Yarım peryot boyunca "m" basamaklı bir çıkış dalgasının genel şekli

Genel olarak basamaklı bir çıkış dalgasında, basamakların başlangıç ve bitişlerini belirleyen θ_k açıları arasında ve basamakların genlikleri olan V_k değerleri arasında herhangi bir bağıntı yoktur. Şekil 2.1 'e göre, m basamaklı genel bir çıkış dalgasında θ_k ve V_k değerleri için sadece

$$\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 \dots < \theta_k \dots < \theta_m < \pi/2 \quad (2.10)$$

$$V_1 < V_2 < V_3 \dots < V_k \dots < V_m \quad (2.11)$$

eşitlikleri geçerli olacaktır. Bu tip dalga şekli için fourier analizi sonucunda elde edilen bağıntılar

$$\begin{aligned} B_n &= 0 & ; \text{ bütün } n\text{'ler için} \\ A_n &= 0 & ; n = 2, 4, 6, 8, \dots \end{aligned}$$

$$v(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{nm} \cdot \sin(n\omega t) \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} A_{nm} = \frac{4}{\pi} & \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} V_1 \cdot \sin(n\omega t) \cdot d(\omega t) + \int_{\theta_2}^{\theta_3} V_2 \cdot \sin(n\omega t) \cdot d(\omega t) + \dots \right. \\ & \left. \dots + \int_{\theta_{m-1}}^{\theta_m} V_{m-1} \cdot \sin(n\omega t) \cdot d(\omega t) + \int_{\theta_m}^{\pi/2} V_m \cdot \sin(n\omega t) \cdot d(\omega t) \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} A_{nm} = \frac{4}{\pi \cdot n} & \left[V_1 \cdot \cos n\theta_1 + (V_2 - V_1) \cdot \cos n\theta_2 + (V_3 - V_2) \cdot \cos n\theta_3 + \dots \right. \\ & \left. \dots + (V_{m-1} - V_{m-2}) \cdot \cos n\theta_{m-1} + (V_m - V_{m-1}) \cdot \cos n\theta_m \right] \end{aligned}$$

 ekilinde dir. Burada m indisi basamak sayısını gösterir.

2.2 BASAMAK GENİŞLİKLERİ BİRBİRİNE EŞİT, GENLİKLERİ İSE BİRBİRİNDEN FARKLI OLAN BASAMAKLI DALGANIN ANALİZİ

Basamak gen likleri birbirine eşit olan basamaklı dalgasında, basamakların başlangıç ve bitişlerini belirleyen θ_k açıları arasında aşağıdaki ilişkiler mevcuttur.

$$\theta_1 = \theta = \frac{\pi}{2} - mP_v \quad (2.14.a)$$

$$\theta_2 = \theta + P_v = \frac{\pi}{2} - (m-1)P_v \quad (2.14.b)$$

$$\theta_3 = \theta + 2P_v = \frac{\pi}{2} - (m-2)P_v \quad (2.14.c)$$

.

.

.

$$\theta_{m-1} = \theta + (m-2)P_v = \frac{\pi}{2} - 2P_v \quad (2.14.d)$$

$$\theta_m = \theta + (m-1)P_v = \frac{\pi}{2} - P_v \quad (2.14.e)$$

m basamak sayısı ve P_v basamak genişliği olmak üzere A_{nm} için aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$A_{nm} = \frac{4}{n \cdot \pi} \left[V_1 \cdot \cos n \left(\frac{\pi}{2} - mP_v \right) + (V_2 - V_1) \cdot \cos n \left(\frac{\pi}{2} - (m-1)P_v \right) \right. \\ \left. \dots + (V_{m-1} - V_{m-2}) \cdot \cos n \left(\frac{\pi}{2} - 2P_v \right) + (V_m - V_{m-1}) \cos n \left(\frac{\pi}{2} - P_v \right) \right] \quad (2.15)$$

2.3 BASAMAK GENLİKLERİ EŞİT, GENİŞLİKLERİ FARKLI OLAN BASAMAKLI DALGANIN ANALİZİ

Burada pratikte karşılaşılabilecek bir güçlüğü göz-önüne almak yararlı olur. Basamakların genlikleri arasında herhangi bir bağıntı olmayan bir basamaklı dalgayı üretecek evirici sisteminde, basamak sayısı kadar evirici katı kullanma zorunluluğu vardır. Pratikte evirici sistemini bir doğru gerilim kaynağından beslemek elverişli olduğundan, uygun transformatör düzenleriyle daha az sayıda evirici katı kullanarak farklı genlikli bu basamakları oluşturma olanakı yoktur. Habuki m basamaklı bir

dalгада, genlikleri belli bir V_0 değerinin tam katları şeklinde seçilirse, o zaman evirici çıkışında bu basamaklar, uygun trafo düzenleriyle ve daha az sayıda evirici katı kullanarak gerçekleştirilebilir. Bu noktadan hareketle m basamaklı dalğanın basamak genlikleri için

$$V_k = k \cdot V_0 \quad k=1,2,3,4,\dots,m \quad (2.16)$$

matematiksel bağıntısını kullanarak dalğanın fourier analizi yapıldığında fourier serisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_{m,max} = m \cdot V_0 \quad (2.17)$$

$$v(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots} A_{nm} \cdot \sin n\omega t \quad (2.18)$$

ve

$$A_{nm} = \frac{4 \cdot V_{m,max}}{\pi \cdot n \cdot m} \left[\cos n\theta_1 + \cos n\theta_2 + \dots + \cos n\theta_{m-1} + \cos n\theta_m \right] \quad (2.19)$$

elde edilir. Bu bağıntıda basamak genlikleri birbirine eşit, basamak genişlikleri ise birbirinden farklıdır ve V_0 bir basamağın genliğini göstermektedir.

2.4 BASAMAK GENİŞLİKLERİ VE GENLİKLERİ BİBİRİNE EŞİT OLAN DALGANIN ANALİZİ

Bu çalışmada bu tip bir çıkışın moment ve diğer parametreler üzerindeki etkisi incelenecektir. Bu incelemeler 2, 3 ve 4 basamaklı çıkışlar için yapılacaktır. Bu tip gerilimin genel halde analizini görelim. Bu durumda

$$\theta + m \cdot P_v = \frac{\pi}{2} \quad (2.20)$$

$$P_v = \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (2.21)$$

$$A_{nm} = \frac{4 \cdot V_{m \cdot \max}}{\pi \cdot n \cdot m} \left[\cos n\theta + \cos n(\theta + P_v) + \dots + \cos n \left[\theta + (m-1)P_v \right] \right] \quad (2.22)$$

(2.21) bağıntısı (2.14) bağıntılarında yerine konularak A_{nm} ifadesi, ilk basamağın tetikleme açısı olan θ 'ya göre düzenlenebilir ve A_{nm}

$$A_{nm} = \frac{4 \cdot V_{m \cdot \max}}{\pi \cdot n \cdot m} \left[\cos n\theta + \cos n \left[\left(\frac{m-1}{m} \right) \theta + \frac{\pi}{2 \cdot m} \right] + \dots + \right. \\ \left. + \cos n \left[\frac{2 \cdot \theta}{m} + \frac{(m-2)\pi}{2 \cdot m} \right] + \cos n \left[\frac{\theta}{m} + \frac{(m-1)\pi}{2 \cdot m} \right] \right] \quad (2.23)$$

şeklinde elde edilir. (2.22) ve (2.23) eşitlikleri harmonik genliklerinin maksimum değerini gösterir. Yukarıda elde edilen (2.23) bağıntısı efektif değer olarak $\sqrt{2}$ 'e bölünerek elde edilir.

$$V_{nm} = \frac{A_{nm}}{\sqrt{2}} \quad (2.24)$$

$$V_{nm} = \frac{4 \cdot V_{m \cdot \max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot m} \left[\cos n\theta + \cos n \left[\left(\frac{m-1}{m} \right) \theta + \frac{\pi}{2 \cdot m} \right] + \dots + \right. \\ \left. + \cos n \left[\left(\frac{2}{m} \right) \theta + \frac{(m-2)\pi}{2 \cdot m} \right] + \cos n \left[\frac{\theta}{m} + \frac{(m-1)\pi}{2 \cdot m} \right] \right] \quad (2.25)$$

yukarıdaki bağıntıda n harmonik mertebesi, m ise basamak sayısını göstermektedir.

BÖLÜM 3: EVİRİCİ BESLEMELİ ASENKRON MOTORUN ZAMAN HARMONİKLER

Peryodik bir basamaklı dalganın, fourier serisi yardımıyla analizi yapıldığında, $\pi/2$ 'den geçen bir düşey eksene göre simetrisinden dolayı sadece tek harmonikleri içermektedir. Basamak genişlikleri birbirine ve genlikleri birbirine eşit alınan m basamaklı bir dalga için elde edilen genel ifade aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$V_{m. \max} = m \cdot V_b \quad (3.1)$$

$$v(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots} A_{nm} \cdot \sin(n\omega t) \quad (3.2)$$

$$V_{nm} = \frac{4 \cdot V_{m \max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot m} \left[\cos n\theta + \cos n \left[\left(\frac{m-1}{m} \right) \theta + \frac{\pi}{2 \cdot m} \right] + \dots \right. \\ \left. \dots + \cos n \left[\frac{2 \cdot \theta}{m} + \frac{(m-2)\pi}{2 \cdot m} \right] + \cos n \left[\frac{\theta}{m} + \frac{(m-1)\pi}{2 \cdot m} \right] \right] \quad (3.3)$$

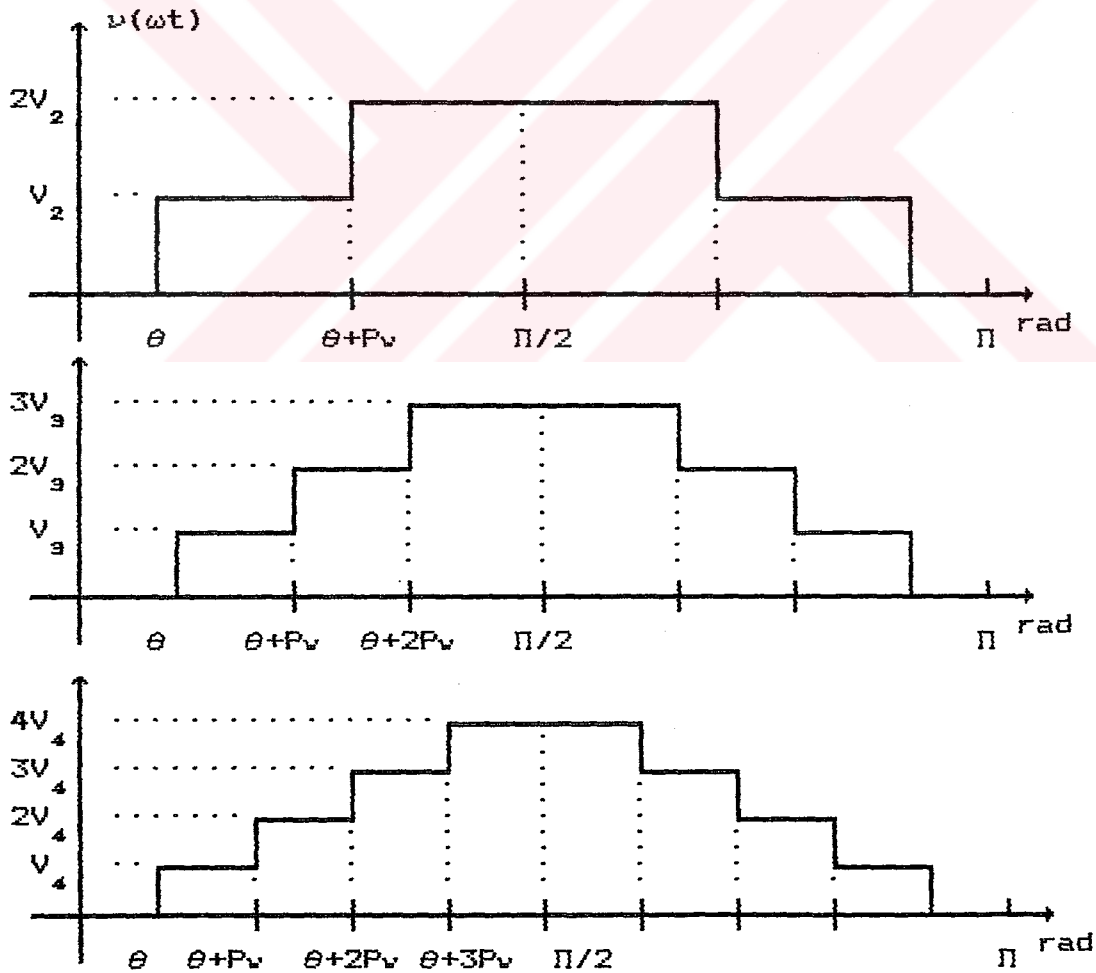
(3.3) eşitliği şekil 3.1 deki 2, 3 ve 4 basamaklı çıkışları için efektif değer olarak sırasıyla şu şekilde ifade edilebilir.

$$V_{n2} = \frac{4 \cdot V_{2 \max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot 2} \left[\cos n\theta + \cos n \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (3.4)$$

$$V_{n3} = \frac{4 \cdot V_{3 \max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot 3} \left[\cos n\theta + \cos n \left(\frac{2 \cdot \theta}{3} + \frac{\pi}{6} \right) + \cos n \left(\frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3} \right) \right] \quad (3.5)$$

$$V_{n4} = \frac{4 \cdot V_{4max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot 4} \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{3 \cdot \theta}{4} + \frac{\pi}{8}\right) + \cos n\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4}\right) + \cos n\left(\frac{\theta}{4} + \frac{3 \cdot \pi}{8}\right) \right] \quad (3.6)$$

Burada V_{n2} , V_{n3} ve V_{n4} sırasıyla 2, 3 ve 4 basamaklı harmonik gerilimlerinin θ açısıyla değişimini gösterir. (3.4), (3.5) ve (3.6) eşitliklerinden de görüldüğü gibi harmonik bileşenlerinin genlikleri harmonik mertebesi ve θ tetikleme açısı ile değişmektedir. Harmonik genlikleri harmonik mertebesiyle ters orantılı olarak azalır. Harmonik mertebesi artarken, harmonik frekansı artmakta ve harmonik gerilim büyüklüğü azaldığından, makinanın eş-değer devresi frekans değişimine bağlı olarak değişir.



Şekil 3.1: Yarım peryot boyunca 2, 3 ve 4 basamaklı dalgalarının çıkış şekilleri

3.1 ASENKRON MAKINANIN TEMEL ESDEĞER DEVRESİ

Bir asenkron makinasında rotor gerilimi ve frekansı kayma ile değiştiği bilinmektedir ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\underline{E}_2 = s \cdot \underline{E}_{20} \quad (3.7)$$

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (3.8)$$

$$X_{2s} = s \cdot X_2 \quad (3.9)$$

$$Z_2 = \left[R_2^2 + (s \cdot X_2)^2 \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{s \cdot E_{20}}{\left[R_2^2 + (s \cdot X_2)^2 \right]^{1/2}} \quad (3.11)$$

$$\cos \phi_2 = \frac{R_2}{\left[R_2^2 + (s \cdot X_2)^2 \right]^{1/2}} \quad (3.12)$$

Eğer rotor büyüklükleri statora indirgenirse aşağıdaki indirgenmiş değerleri bulunur.

$$\underline{E}'_{20} = \bar{u} \cdot \underline{E}_{20} \quad (3.13)$$

$$I'_2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{I_2}{\bar{u}} \quad (3.14)$$

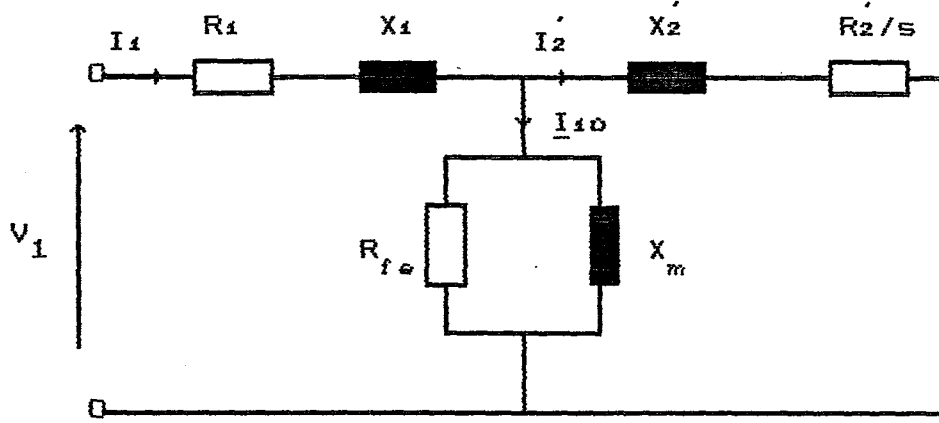
$$R'_2 = \frac{m_1}{m_2} \cdot \bar{u}^2 \cdot R_2 \quad (3.15)$$

$$X'_2 = \frac{m_1}{m_2} \cdot \bar{u}^2 \cdot X_2 \quad (3.16)$$

$$\bar{u} = \frac{N_1 \cdot K_{v1}}{N_2 \cdot K_{v2}} \quad (3.17)$$

Gerçek rotor devresinin gerilim denklemi kayma ile bölünerek endüklenen gerilimin ve kaçak reaktansın kaymadan

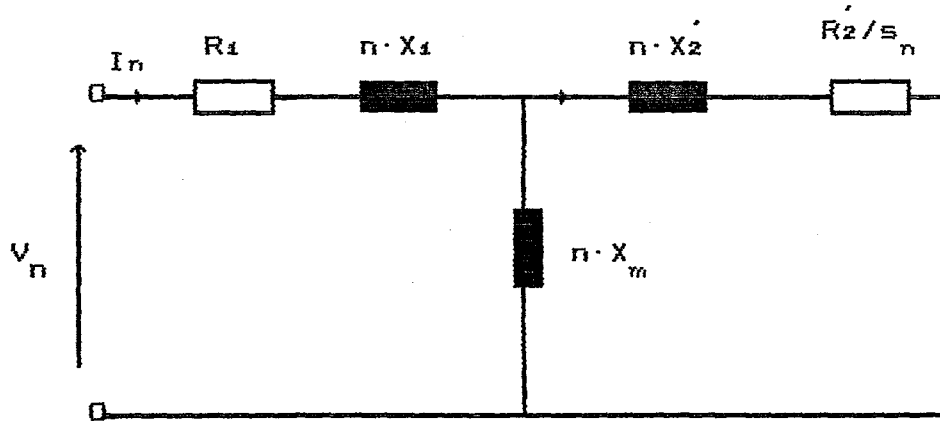
bağımsız olduğu eşdeğer devreye geçilir. Şekil 3.2 asenkron makinanın T eşdeğer devresini göstermektedir



Şekil 3.2: Asenkron makinanın temel eşdeğer devresi

3.2 ZAMAN HARMONİKLERİNİN EŞDEĞER DEVRESİ

Stator ve rotordaki direnc ve endüktansların akımın değişimiyle ve iletkenlerdeki deri olayı etkisi ile değişmediği kabul edilerek, n mertebeden zaman harmoniği için eşdeğer devre şekil 3.3 deki gibidir.



şekil 3.3: Zaman harmonikleri için T eşdeğer devresi

Bu eşdeğer devrede n zaman harmoniği mertebesi olmak üzere

$$s_n = 1 + \frac{(1-s)}{n} \quad (3.18)$$

harmonik kaymasını verir [5]. Burada (+) işaret temel bileşen alanına zıt yönde dönen alan harmoniklerine ait kayma değerini verirken, (-) işaret aynı yönde dönen harmonikler için dir. (3.18) eşitliği herhangi bir harmonik mertebesi için, harmonik kaymasının yaklaşık olarak 1'e eşit olduğunu gösterir. Stator ve rotor kaçak reaktanslarındaki ve mıknatıslanma reaktansındaki artışlar harmonik frekansındaki değişmeler ile hesaplanır.

Asenkron makinanın eşdeğer devreleri için deri olayı etkisi dikkate alınarak rotor parametreleri aşağıdaki eşitlikler kullanarak bulunabilir [18].

$$K_r = s \cdot \frac{\sinh(2s) + \sin(2s)}{\cosh(2s) - \cos(2s)} \quad (3.19)$$

$$K_x = \frac{3}{2 \cdot s} \cdot \frac{\sinh(2s) - \sin(2s)}{\cosh(2s) - \cos(2s)} \quad (3.20)$$

$$s = h \cdot \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \frac{b}{b_0} \cdot \frac{f_2}{\rho}} \quad (3.21)$$

Burada h oluk yüksekliği, b_0 oluk genişliği ve b sargı genişliğini göstermektedir. (3.21) bağıntısında, bütün büyüklüklerin boyutları konulursa s 'nin boyutsuz olduğu görülür. Pratik hesaplarda, uzunluklar cm ile ifade edilir. $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$] ve $f_2 = 50 \cdot \text{s}$ değerleri (3.21) eşitliğinde yerleştirildiğinde

$$s = 0.14 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{b}{b_0} \cdot \frac{s}{\rho}} \quad (3.22)$$

s 'nin kayma ile orantılı olduğu görülür. Alüminyum ve

bakır için aşağıdaki tabloda 50, 250 ve 350 Hz 'de k_r ve k_x değerleri verilmiştir. $\rho_{AL}=0.02864 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, $b=b_0$ ve $\rho_{CU}=0.017521 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ alınmıştır. Tablo 3.1 deki değerlerden görüldüğü gibi s_{CU} , s_{AL} , K_{rCU} ve K_{rAL} değerleri frekansla artarken, K_{xCU} ve K_{xAL} değerleri frekans arttıkça azalmaktadır.

Tablo 3.1: Alüminyum ve Bakır için deri olay etkisi

f	s_{CU}	s_{AL}	K_{rCU}	K_{rAL}	K_{xCU}	K_{xAL}
50	1.061	0.835	1.107	1.042	0.969	0.988
250	2.373	1.869	2.333	1.748	0.643	0.792
350	2.808	2.211	2.811	2.145	0.540	0.689

(3.19), (3.20) ve (3.21) eşitlikleri gözönüne alınarak yüksek harmonik frekanslarında, stator iletkenleri yuvarlak rotor iletkenleri ise dikdörtgen veya sincap kafesli olan motorlarda, rotor parametrelerinin statora indirgenmiş değerleri ve stator kaçak reaktansı

$$X_{1n} = n \cdot X_1 \quad (3.23)$$

$$X_{2n} = n \cdot k_{xn} \cdot X_2 \quad (3.24)$$

$$R_{2n} = K_{rn} \cdot R_2 \quad (3.25)$$

dir. R_2 ve X_2 rotoru bloke edilmiş asenkron makinanın temel bileşen direnç ve endüktansının statora indirgenmiş değerleri gösterirken, n harmonik mertebesini gösterir. Terminal uçlarından bakıldığında, asenkron makinanın T tipi eşdeğer devresi kullanarak (şekil 3.4)

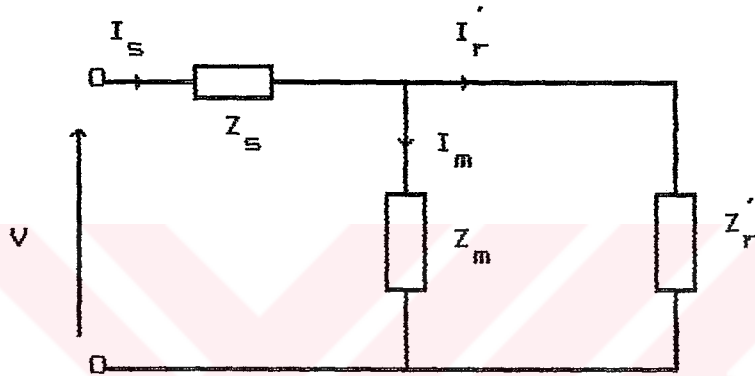
$$I_1 = \frac{V}{Z_{se}} \quad (3.26)$$

$$I_2 = \frac{V}{Z_{re}} \quad (3.27)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada Z_{re} ve Z_{se} aşağıdaki gibi ifade edilir [17].

$$Z_{se} = \frac{\left[Z_s \cdot Z_r' + Z_m (Z_s + Z_r') \right]}{(Z_r' + Z_m)} \quad (3.28)$$

$$Z_{re} = \frac{Z_{se} \cdot (Z_r' + Z_m)}{Z_m} \quad (3.29)$$



Şekil 3.4 : T tipi eşdeğer devre

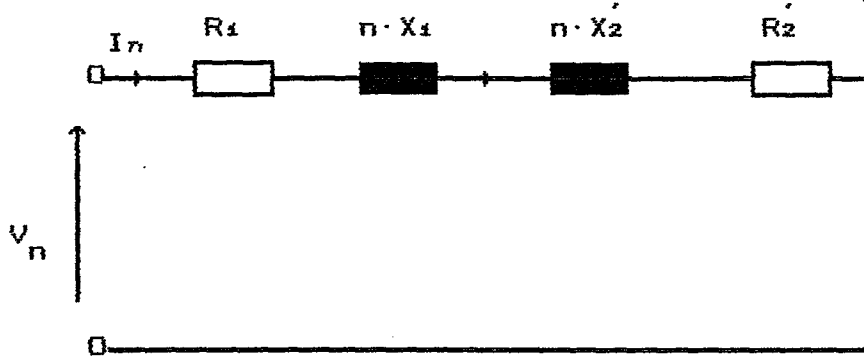
3.3 HARMONİK MOMENTİ, AKIMI VE HARMONİK KAYIPLARI

Harmonik bileşenleri için, en basit eşdeğer devre kullanarak (3.26), (3.27), (3.28) ve (3.29) bağıntıları basitleştirilebilir. Demir kayıpları, harmonik mertebesi ve frekanstan etkilenmediği kabul edilerek, demir kayıplarını gösteren direnç ihmal edilebilir. Ayrıca n'inci mertebeden harmonik için mıknatıslanma reaktansı

$$X_{mn} = n \cdot X_m \quad (3.30)$$

dir. X_{mn} dikkate alınan ve temel bileşene en yakın olan 5 ve 7'inci harmonikleri için çok büyük değerlere sahip olacağından eşdeğer devrede ihmal edilebilir. Daha önce de belirtildiği gibi (3.18) bağıntısına göre $s_n \approx 1$ 'e

eşittir. Böylece zaman harmoniklerinin eşdeğer devresi, harmonik kayması yaklaşık bire eşit kabul edilerek, T eşdeğer devresinden şekil 3.5 de gösterilen en basit eşdeğer devresine geçilebilir.



Şekil 3.5 : Asenkron makinasının zaman harmoniklerinin eşdeğer devresi

Bu durumda harmonik akımları ve harmonik momentleri için aşağıdaki ifadeler bulunabilir. Burada V_n n'inci mertebeden harmonik gerilimini gösterir.

$$I_n = \frac{V_n}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2 n}{s_n} \right)^2 + (X_{1n} + X_{2n})^2}} \quad (3.31)$$

ve

$$M_n = \frac{m_1 \cdot p}{2\pi f_1 \cdot n} \cdot \frac{(R_2 n / s_n) \cdot V_n^2}{\left(R_1 + \frac{R_2 n}{s_n} \right)^2 + (X_{1n} + X_{2n})^2} \quad (3.32)$$

İletkenlerdeki bakır kayıpları akımın karesiyle orantılı olduğundan n'inci harmoniğin toplam bakır kayıpları

$$P_{n,cu} = m_1 \cdot \frac{V_n^2}{\left(R_1 + \frac{R_2 n}{s_n} \right)^2 + (X_{1n} + X_{2n})^2} \quad (3.33)$$

dir. Demir kayıpları, statorda meydana gelen kayıplar ve rotorda meydana gelen kayıplar olarak iki temel grupta toplanır. Sinüzoidal gerilim ile beslenen asenkron makinelerde kaymanın küçük olması nedeniyle rotor demir kayıpları dikkate alınmaz. Stator demir kayıpları ise akı yoğunluğu, frekans ve stator manyetik devre ağırlığı ile ilişkilidir. Makinanın doyma olmayan bölgede çalıştığı kabul edildiğinde, histerezis karaktrestiği liner eğime sahiptir. Böylece demir kayıpları

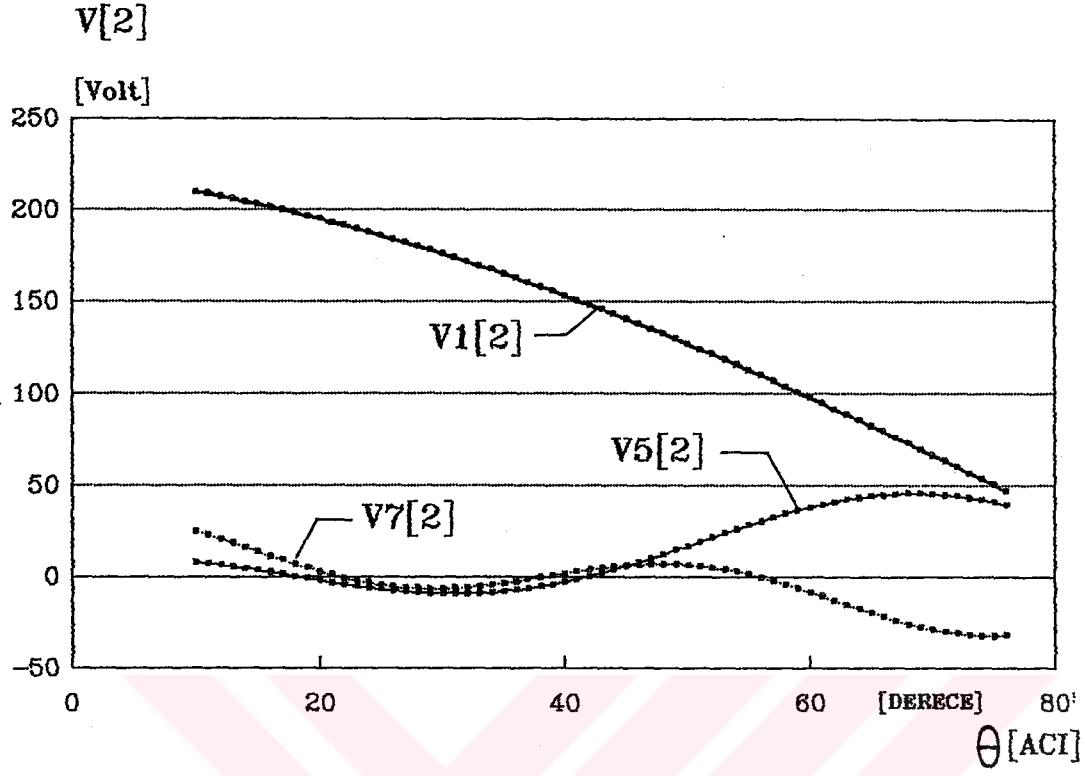
$$P_{fen} = K_{fe} \cdot V_n \quad (3.34)$$

ile hesaplanır. Burada K_{fe} bir sabittir ve makinanın fiziksel büyüklükleri ile alakalıdır. Böylece ilave kayıpları olan sürtünme ve rüzgar kayıpları ihmal edilerek bir asenkron makinanın toplam kayıpları aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenir.

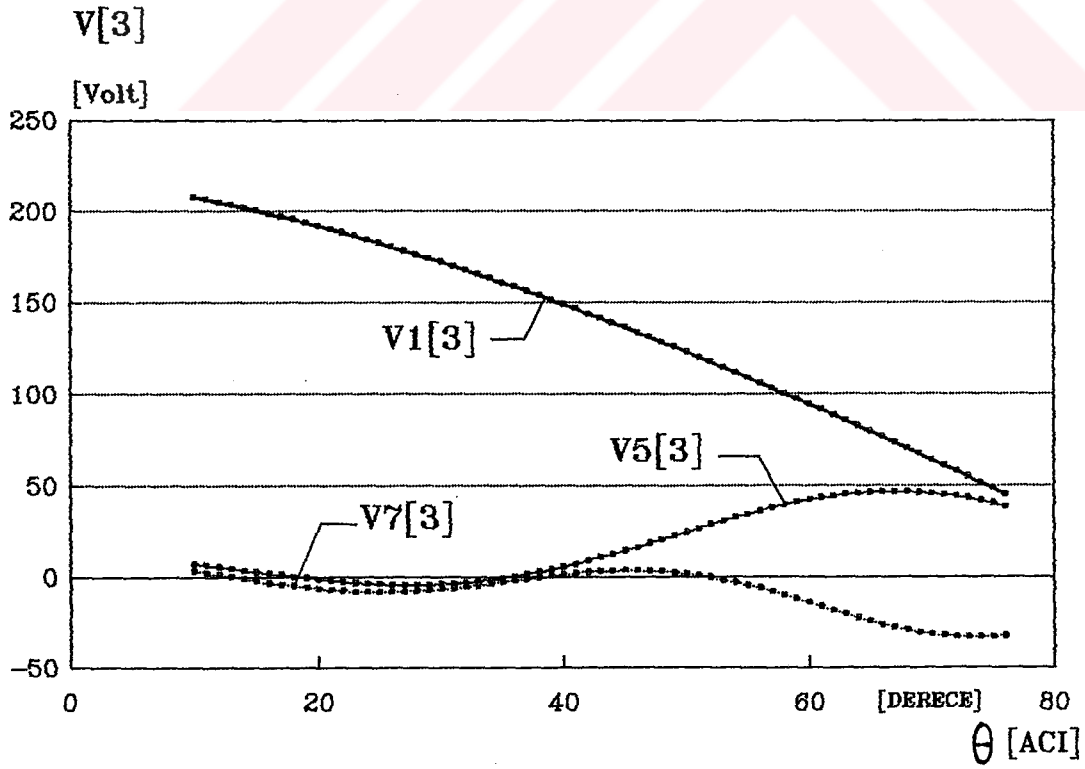
$$P_{TOP} = P_{cu} + P_{fe} \quad (3.35)$$

3.4 HESAPLAMALARDA KULLANILAN METOD

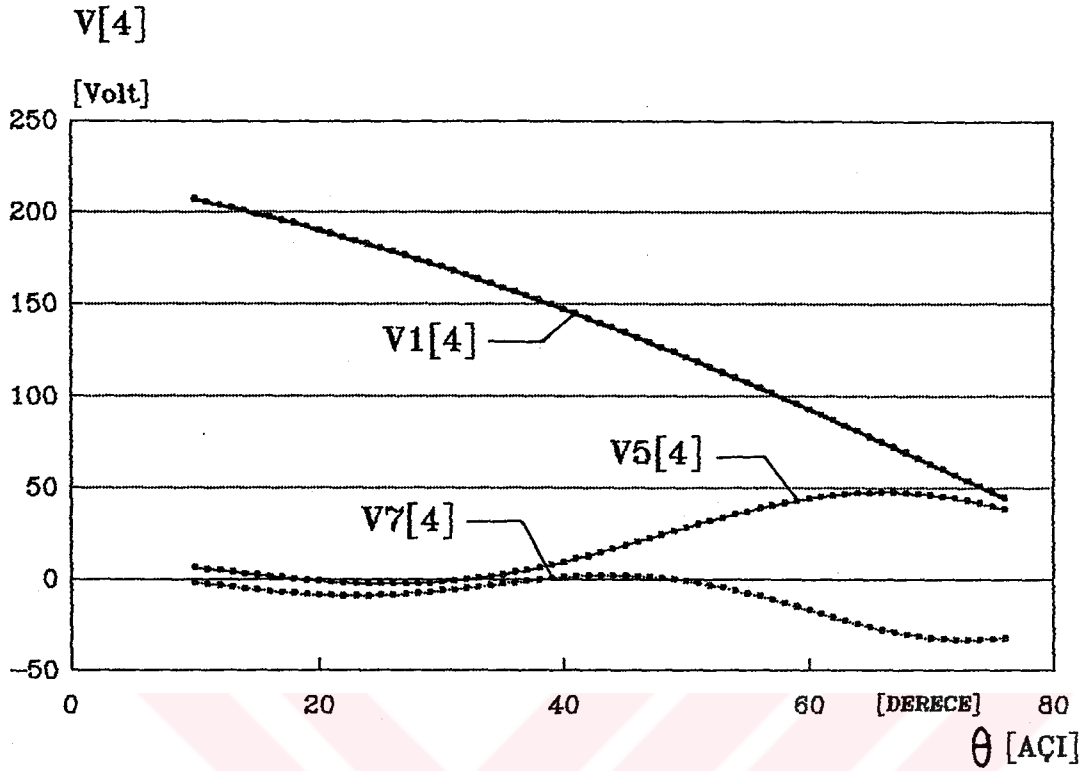
Uygulanan gerilimlerdeki, harmonik akım ve harmonik moment ifadeleri bölüm 3.3 de gösterilmiştir. Basamaklı kare dalga, darbe serileriyle oluşturulduğundan harmoniklerin efektif ve tepe değerleri fourier serisi yardımıyla hesaplanabilir (bölüm 2.4). (3.4), (3.5) ve (3.6) bağıntılarından da görüldüğü gibi eviricinin besleme doğru gerilimi veya başka değişle basamak gerilimi değişmezse θ tetikleme açısının değişimiyle sadece 5'inci ve 7'inci harmonik genlikleri değil aynı zamanda temel bileşen gerilimi de değişir. Bu değişim, θ açısı 0° 'sinden 90° 'sine doğru artırıldığında, sargı üzerine gelen temel bileşen gerilimi 220 volttan sıfıra düşecek şekildedir.



Şekil 3.6 : İki basamaklı dalganın 5, 7 ve temel harmonik gerilimlerinin tetikleme açısı ile değişimi



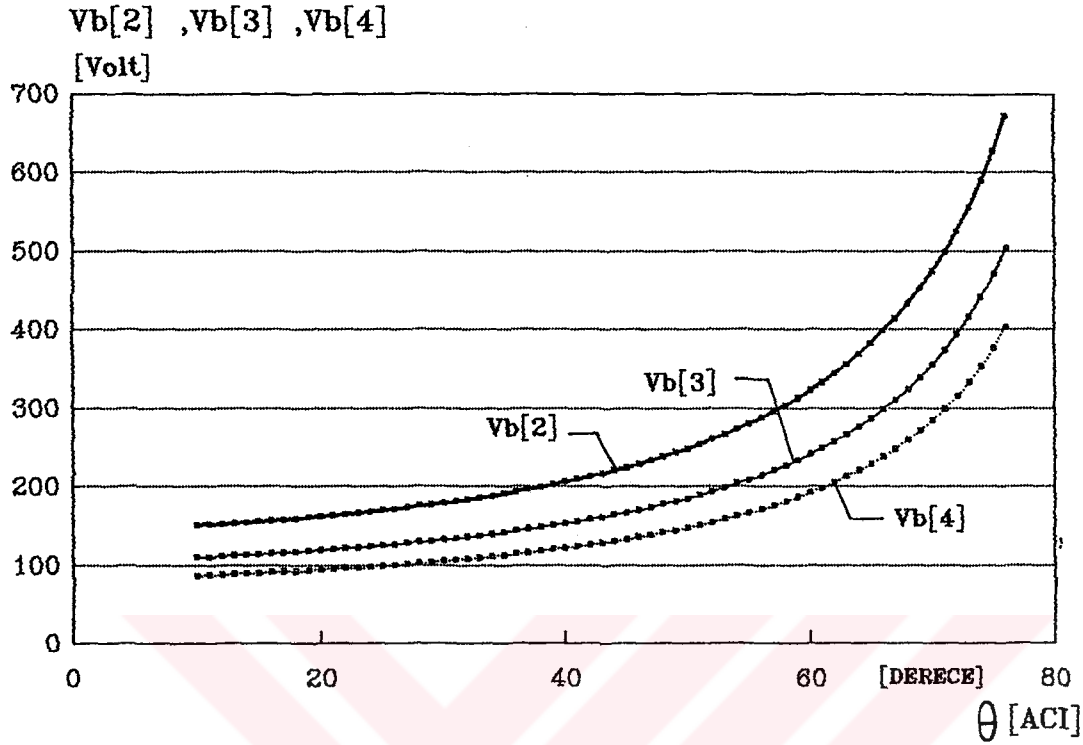
Şekil 3.7 : Üç basamaklı dalganın 5, 7 ve temel harmonik gerilimlerinin tetikleme açısı ile değişimi



şekil 3.8 : Dört basamaklı dalga'nın 5, 7 ve temel harmonik gerilimlerinin tetikleme açısı ile değişimi

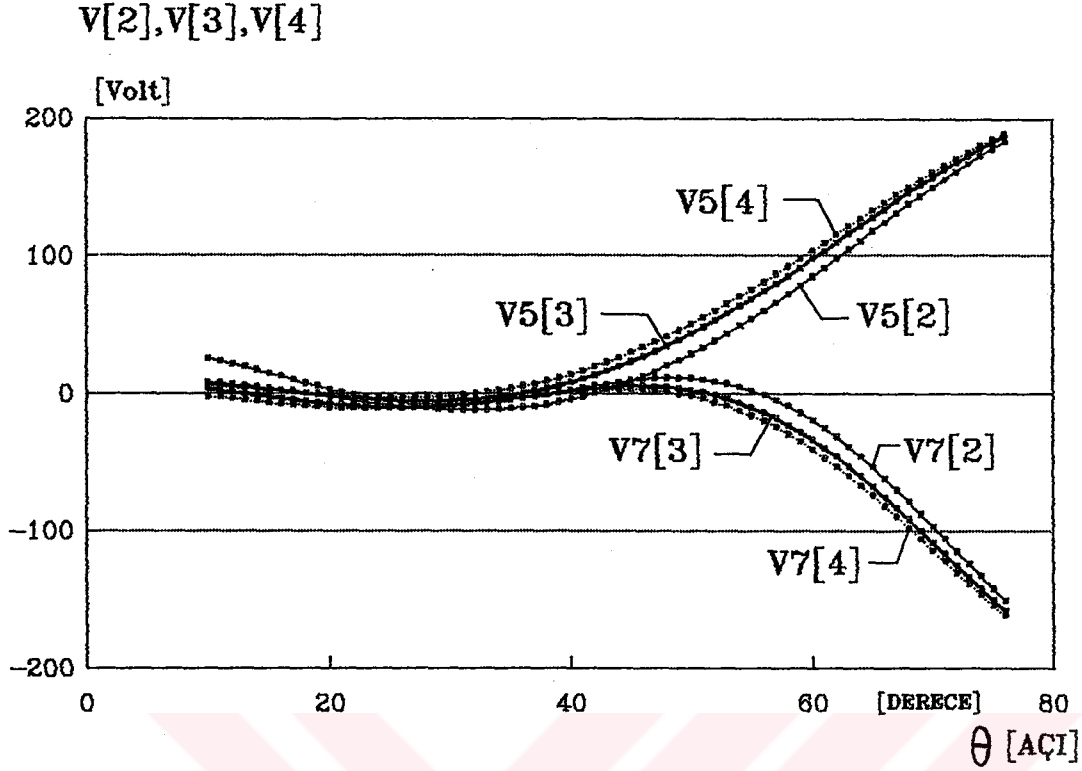
Bu değişmeler 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimleri için şekil 3.6, 3.7, 3.8 de gösterilmiştir. Köşeli perantez içindeki rakamlar basamak sayısını gösterir.

Harmonik eliminasyonu veya bu çalışmada olduğu gibi harmoniklerin en etkin olduğu durumları ve onların etkilerini araştırırken, herhangi bir θ tetikleme açısı için basamak gerilimi, temel bileşen geriliminin 220 voltta sabit kalacak şekilde ayarlanmalıdır. Temel bileşen geriliminin 220 voltta sabit kalması için basamak geriliminin θ tetikleme açısıyla değişimi şekil 3.9 da gösterilmiştir. θ açısı ilk basamağın tetikleme açısını gösterir ve diğer basamakların tetikleme açıları (2.21) ve (2.14) bağıntıları kullanarak θ 'a göre düzenlenmiştir. Temel gerilim 220 ta sabitken harmonik gerilim ve momentlerinin genlikleri basamak genişliğinden etkilendiği bu analizlerden elde edilmiştir.



Sekil 3.9 : Sargı üzerindeki temel bileşen geriliminin 220 v'ta sabit kalması için 2, 3 ve 4 basamaklı dalgaların basamak gerilimlerinin tetikleme açısı ile değişimi

Temel gerilim sabit iken 2, 3 ve 4 basamaklı dalgalarının harmonik gerilimlerinin θ ile değişimi şekil 3.10 da elde edilmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi 5'inci ve 7'inci harmonik gerilimleri, tetikleme açısının yaklaşık 40° 'sine kadar çok düşük değerlerde görülür ve 40° 'den sonraki θ açılarında 5'inci harmonik genlikleri pozitif değerlerde artarken 7'inci harmonik genlikleri negatif değerlerde artmaktadır. 5 ve 7'inci harmonikleri herhangi bir θ açısı için elde edilirken, sargı üzerine gelen temel gerilimin 220 v'ta sabit kalması için şekil 3.9 daki eğrilerden, aynı θ açısı için basamak gerilimleri (3.4), (3.5) ve (3.6) bağıntılarında yerleştirilerek harmonik gerilimlerinin efektif değerleri elde edilir.



Şekil 3.10 : $V_1=220$ v'ta sabit tutulan 2, 3 ve 4 basamaklı çıkışların harmonik gerilimlerinin θ tetikleme açısıyla değişimi

Harmonik akımları ve harmonik momentleri daha önce bölüm 3.3 'da verilen (3.31) ve (3.32) bağıntılarından yararlanarak, herhangi bir harmonik mertebesi için hesaplanır. Moment ve akımın değişimine sebep olan en önemli harmonikler 5, 7, 11 ve 13 olarak bilinir. Daha yüksek harmonikler düşük gerilim değerlerine sahip olduklarından ihmal edilir. Bu çalışmada sadece 5 ve 7'inci harmonikler gözönüne alınarak akım ve momentin değişimi belirli kaymaları için hesaplanır.

3.5 HARMONİK MOMENTLERİ ETKİSİNİN KULLANIMI

Harmonik momentlerinin makina performansında belirli etkilere sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle harmonik etkilerinin azaltılması metodları, azalan performansı arttırmak için araştırılmaktadır.

Bu bölümde farklı firmalar tarafından üretilen, fakat aynı temel büyüklüklere (güç, gerilim) sahip olan iki asenkron makina gözönüne alınacaktır. Eşdeğer devre parametrelerinin birbirine eşit olmayacağı kaçınılmazdır, fakat güç, devir sayısı ve moment ihtiyacını karşılamak için yaklaşık değerlere sahip olacaktır. Asenkron motorda herhangi bir arıza olduğunda aynı çalışma şartlarını sağlayan başka bir motor kullanılmalıdır. Basamaklı kare dalga ile beslenen her iki motorda benzer etkileri görülür. Arıza durumunda birinci motor çalışmanın devamı için yedegile değiştirilir. Motorun yedeklenmesinden sonra eviricinin çıkış dalga şekli, yeni bir dalga şekline dönüştürülmezse ikinci motor, birinci motor tarafından elde edilen aynı çalışma şartlarını sağlayamayacaktır. Kayma, moment ve verim farklı değerlerde olacaktır. Devir sayısının hassas olarak ayarlanmasının gerekmediği bazı uygulamalarda, motorun değiştirilmesi sorun yaratmayacaktır. Fakat edüstrideki bazı uygulamalarda, motorların yedeklenmesi durumunda kayma ve moment değerlerinin değişmemesi istenir. Bu koşullar altında, evirici çıkış dalga şeklinin tekrar ayarlanması soruna yardımcı olabilmektedir.

Basamakların genişliklerinin tekrar ayarlanması veya farklı basamak sayılı yeni bir dalga şeklini anahtarlaraarak, harmoniklerin genlikleriyle oynamak temel prensip olarak alınır. İki farklı asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri veri olarak alınıp yazılan bilgisayar programında değişik kayma değerlerinde harmonik momentlerinin ve toplam momentinin her iki makina için bulunmuştur.

5 ve 11'inci harmonikler toplam moment üzerinde frenleme etkisi yaparken, 7 ve 13'üncü harmonikleri temel momenti desteklemektedir. Bundan dolayı verilen kaymada, yedek motorun momenti, ana motorunkinden daha büyük olursa frenleme etkisine sahip momentleri, toplam harmonik

momentini azaltacak yönde olmaları gerekir. Yedek motor momentini ana motorunkinden daha küçük olursa, hesaplama işlemi toplam harmonik momentini arttırmak için kullanılmalıdır.

3.5.1 HARMONİK MOMENTLERİ

Bölüm 3.5 de bahsedilen prensipler iki farklı asenkron motora uygulanmıştır. Bu çalışmada pascal dilinde yazılan programlar ile analizler yapılmıştır. Bu bölümde farklı firmalar tarafından üretilen iki özdeş motor yedekleme için düşünülmüştür. Amaç motorlardaki harmonik etkileri kullanarak moment ve kaymanın önceden belirlenmesi.

Verilen kaymada iki motordan birisinin daha büyük moment üreteceği kesindir. Bu yüzden bu motorların bir-biriyle yedeklenmesi gerektiğinde ve yapıldığında moment ve kayma olarak bilinen çalışma koşulları sağlanamayacaktır. Bu yüzden gerilim dalgasının basamak genişliği veya basamak sayısı değiştirilerek harmonik etkilerinden yararlanmaya ve iki motorun çıkış momentleri istenilen kayma değerinde eşitlenmeye çalışılacaktır.

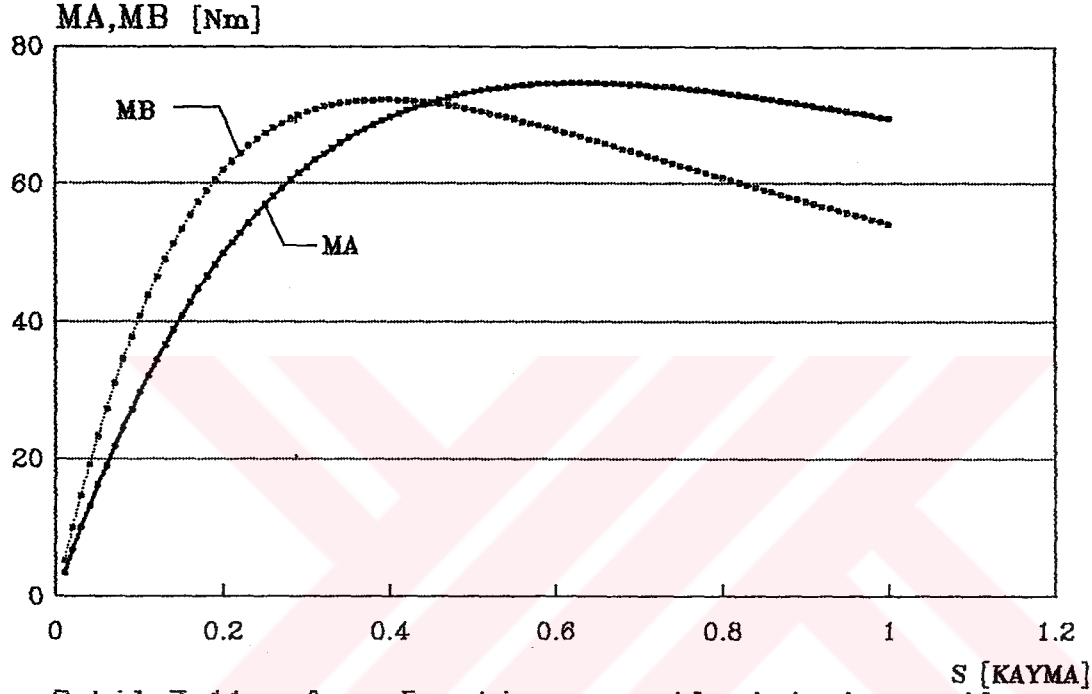
Sekil 3.11 'da farklı firmalar tarafından üretilen iki asenkron makinanın M_1 temel momentlerinin kayma ile değişimi gösterilmiştir. $s=0$ 'dan itibaren her iki egrinin birbirinden çok farklı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan asenkron motorları aşağıda verilen temel büyüklüklere ve eşdeğer devre parametrelerine sahiptir.

A motoru : 3 kW , $p=2$, 50 Hz , 380 volt , yıldız bağlı

$R_1 = 1.97$	ohm/faz	$R_2' = 2.656$	ohm/faz
$X_1 = 1.867$	ohm/faz	$X_2' = 1.867$	ohm/faz
$R_{\phi} = 354$	ohm/faz	$X_m = 82.36$	ohm/faz

B motou : 3 kW , p=2 , 50 Hz , 380 volt , yıldız bağı

$R_1 = 1.89$	ohm/faz	$R_2 = 1.77$	ohm/faz
$X_1 = 2.05$	ohm/faz	$X_2 = 2.05$	ohm/faz
$R_{fe} = 133$	ohm/faz	$X_h = 73.4$	ohm/faz



Sekil 3.11 : A ve B makina momentlerinin kayma ile değişimi

Motorların kalkış ve devrilme momentleri farklıdır. $s=0.46$ için A ve B motorlarının momentleri birbirine eşittir ve görüldüğü gibi s_{Ad} ve s_{Bd} devrilme kaymaları oldukça farklıdır.

Harmonik momentleri (3.18) ve (3.32) bağıntıları kullanılarak hesaplanılır ve toplam moment aşağıdaki gibi

$$M_{Top} = M_1 - M_5 + M_7 \quad (3.36)$$

temel moment bileşeni ile diğer harmoniklerin toplamıyla elde edilir.

2, 3 ve 4 basamaklı gerilimleri için elde edilen (3.4) (3.5) ve (3.6) bağıntıları (3.32) eşitliğinde yerleştirilerek sırasıyla 2, 3, ve 4 basamaklı çıkışları için harmonik momentleri aşağıdaki gibi elde edilir. Burada M_{2n} , M_{3n} ve M_{4n} sırasıyla 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimlerin makinada ürettikleri n'inci mertebeden harmonik momentlerini göstermektedir.

$$K = \frac{m_1 \cdot p}{2\pi f_1 \cdot n} \cdot \frac{(K_{xn} \cdot R_2 / s_n)}{\left[(R_1 + \frac{K_{xn} \cdot R_2}{s_n})^2 + (X_1 + K_{xn} \cdot X_2')^2 \cdot n^2 \right]}$$

(3.37)

ise

$$M_{2n} = K \cdot \left(\frac{4 \cdot V_{2max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot 2} \right)^2 \cdot \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \right]^2$$

(3.38)

$$M_{3n} = K \cdot \left(\frac{4 \cdot V_{3max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot 3} \right)^2 \cdot \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{2 \cdot \theta}{3} + \frac{\pi}{6}\right) + \cos n\left(\frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3}\right) \right]^2$$

(3.39)

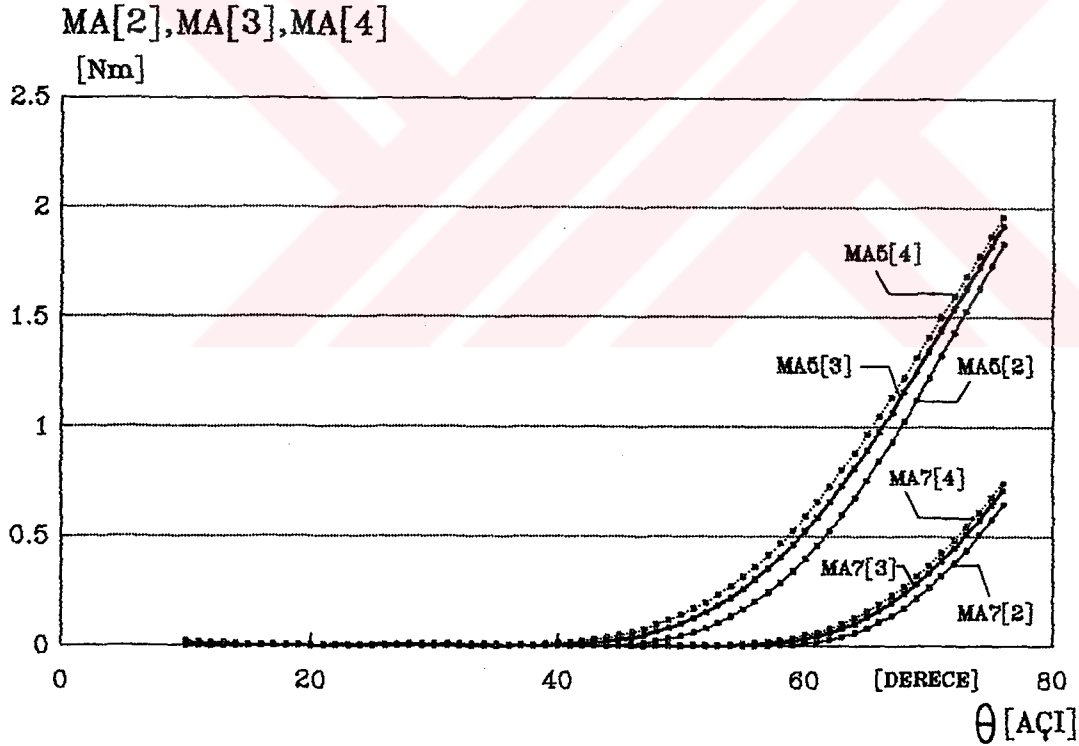
$$M_{4n} = K \cdot \left(\frac{4 \cdot V_{4max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot 4} \right)^2 \cdot \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{3 \cdot \theta}{4} + \frac{\pi}{8}\right) + \cos n\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4}\right) + \cos n\left(\frac{\theta}{4} + \frac{3 \cdot \pi}{8}\right) \right]^2$$

(3.40)

Yukarıdaki moment bağıntılarında, temel gerilim bütün θ değerlerinde sabit kalması için V_{2max} , V_{3max} ve V_{4max}

değerleri, basamak gerilimleri (3.1) bağıntısında yerleştirilerek elde edilir ve böylece harmonik momentleri şekil 3.1 de gösterilen her üç tipi dalga çıkışı için $s_n \approx 1$ olarak bulunur. Burada V_{2max} , V_{3max} ve V_{4max} sırasıyla 2, 3 ve 4 basamaklı dalgaların maksimum değerlerini gösterirken θ açısı ilk basamağın tetikleme açısını gösterir. Diğer basamakların tetikleme açıları θ 'ya göre düzenlenmiştir.

A makinasının harmonik momentlerinin tetikleme açılarıyla değişimi şekil 3.12 'da gösterilmiştir. Bu şekillerdeki köşeli parantez içindeki rakamlar, dalga şeklinin bir yarı peryodundaki basamak sayısını gösterir.

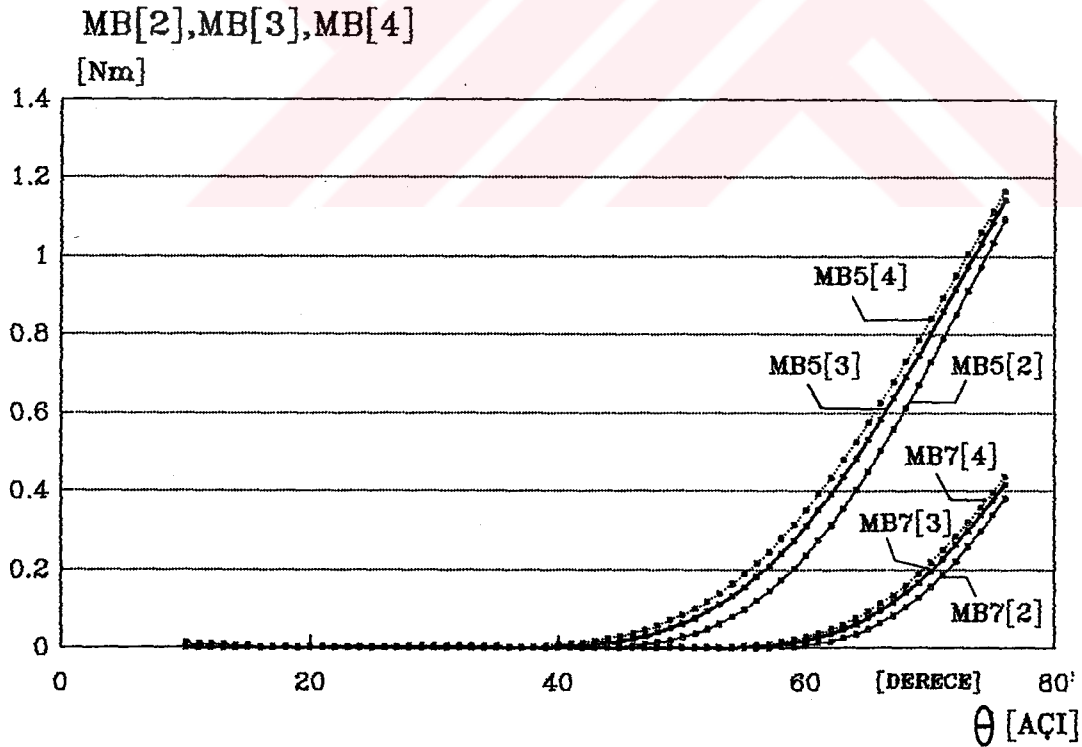


Şekil 3.12 : 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimlerinin A makinasında ürettiği 5 ve 7'inci harmonik momentleri

Şekil 3.12 'deki A makinasının harmonik momentleri incelendiğinde sırasıyla 4, 3 ve 2 basamaklı harmonik momentleri aynı θ açısı için daha büyük değerlere sahip

oldukları görülür. Ayrıca 5'inci harmonik momentleri yaklaşık olarak 40° 'ye kadar sıfır iken 7'inci harmonikler 57° 'ye kadar sıfır değerindedir. Herhangi bir θ tetikleme açısında 5'inci harmonik momentleri, her üç dalga şekli için, 7'inci harmonik momentlerinden daha büyük değerlere sahiptir. Burada açının bütün değerleri için 7'inci harmonikler 5'inci harmoniklerden daha küçükken DGM 'li dalga için yapılan araştırmada [6], dört darbeli dalgada, 7'inci harmonik momentleri 5'inci harmonik momentlerinden daha büyük olduğu tetikleme açıları görülmüştür.

Şekil 3.12 den görüldüğü gibi tetikleme açısının yaklaşık 46° 'sine kadar A makinasının toplam momenti, $-M_5 + M_7 \approx 0$ olduğundan dolayı, temel bileşen momentine eşittir.



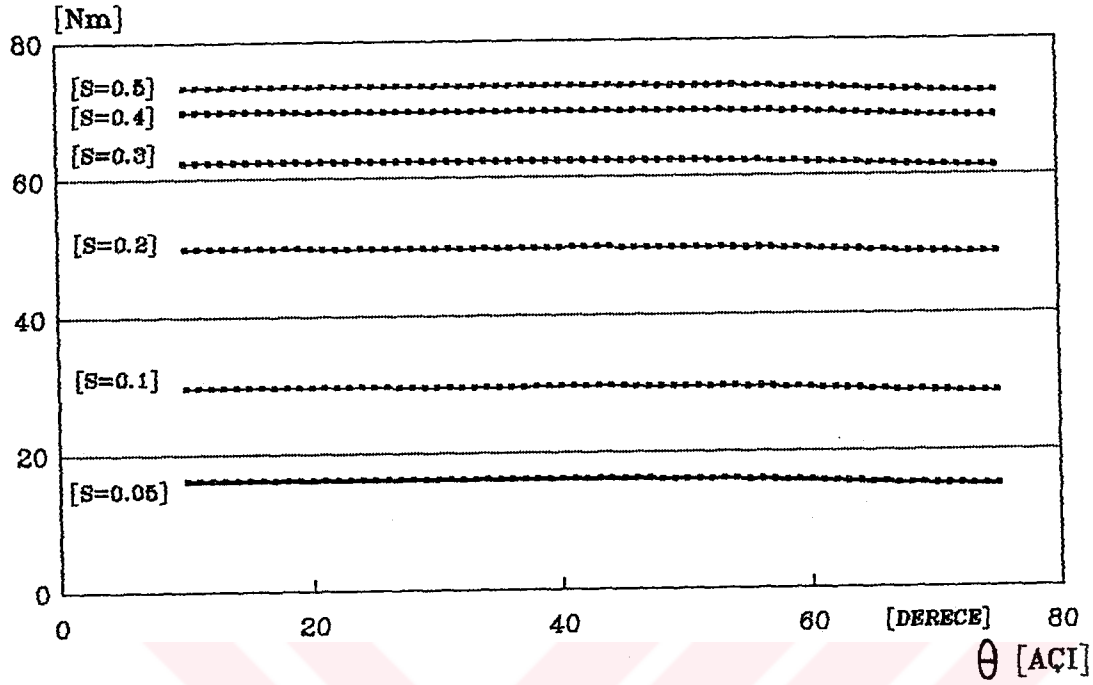
Şekil 3.13 : 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimlerinin B makinasında ürettiği, 5'inci ve 7'inci harmonik momentleri

Aynı gerilim dalga şeklinin B makinasına uygulanmasıyla 5'inci ve 7'inci harmonik momentlerinin, basamak genişlikleriyle ve dolayısıyla ilk basamağın tetikleme açısıyla değişimi bulunabilir. B makinasına ait harmonik momentlerinin θ ile değişimi şekil 3.13 'de gösterilmiştir. Yukarıda A makinası için bahsedilen durumlar B makinası için de geçerlidir, fakat B makinası için herhangi bir θ açısında elde edilen harmonik momentleri, aynı açıda A makinası için elde edilen değerlerden daha küçüktür. Bu da direk olarak eşdeğer devre parametreleriyle ilgilidir. B makinasının R_1 ve R_2 direnç değerleri A makinasına ait olan değerlerden daha küçük, buna karşın X_1 ve X_2 değerleri daha büyüktür ve sonuç olarak (3.32) eşitliğinden de görüldüğü gibi X_1 ve X_2 reaktanslarının n harmonik mertebesi ile çarpıldığından harmonik içeriği azaltmakta ve harmonik momentleri temel moment üzerinde daha az etkin olmaktadır.

Sonuç olarak aynı kayma noktasında elektromanyetik momenti daha büyük olan motorda, harmoniklerin toplam olarak etkisi daha azdır. A ve B makinaları için farklı kaymalarda elde edilen toplam momentin θ açısı ile değişimi şekil 3.14 , 3.15 , 3.16 , 3.17 , 3.18 , ve 3.19 da gösterilmiştir.

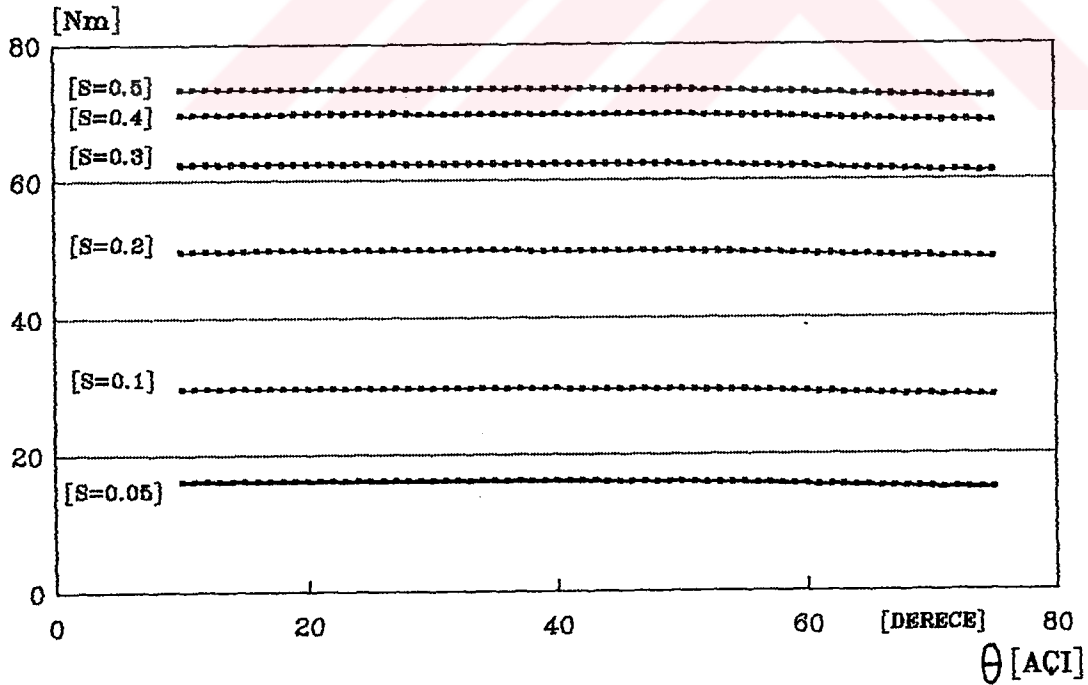
Toplam moment değişimi bulunurken , temel bileşen besleme gerilimi 220 voltta sabit tutulmuş ve dolayısıyla temel bileşen momenti değişmemektedir. (3.36) eşitliği yardımıyla $s = 0.05$ 'den $s = 0.5$ 'e kadar 2, 3 ve 4 basamaklı dalgaları için, A ve B makinaların toplam momentlerinin tetikleme açısı ile değişimi elde edilmiştir.

MTA2



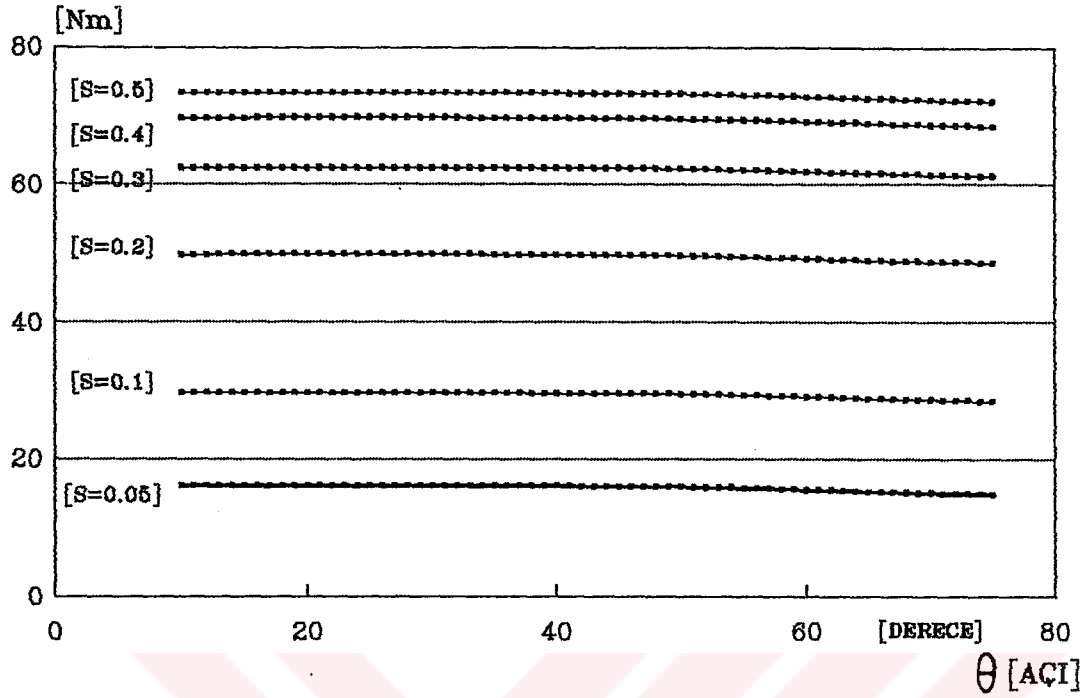
Şekil 3.14 : İki basamaklı gerilimin değişik kaymalarda A makinasında ürettiği toplam momentin tetikleme açısı ile değişimi

MTA3



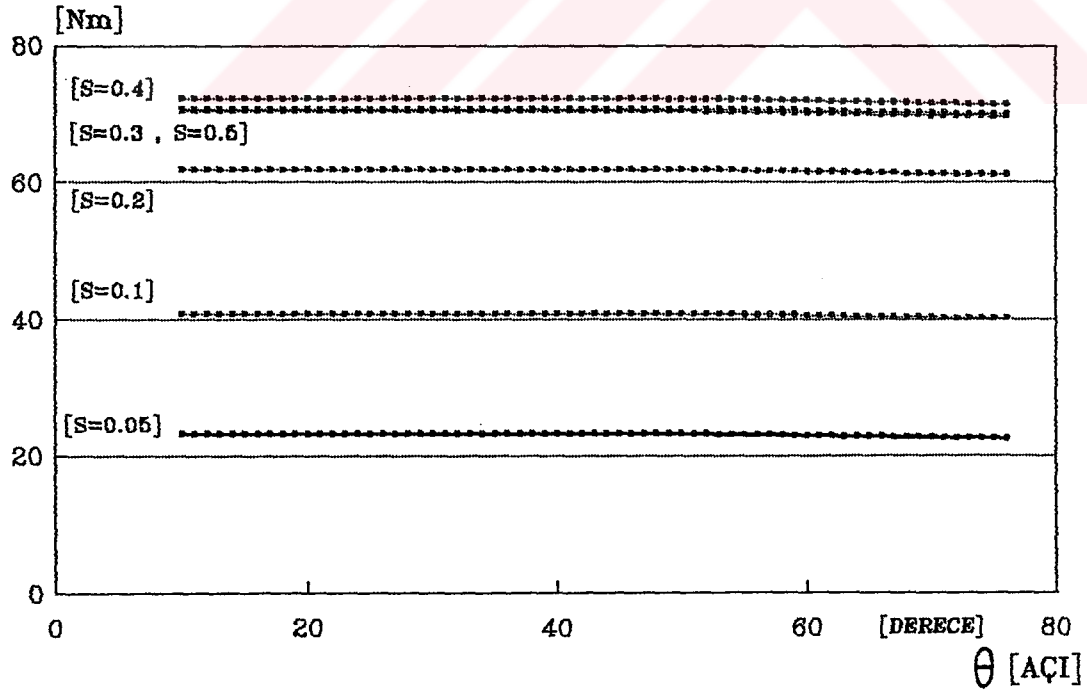
Şekil 3.15 : Üç basamaklı gerilimin değişik kaymalarda A makinasında ürettiği toplam momentin tetikleme açısı ile değişimi

MTA4



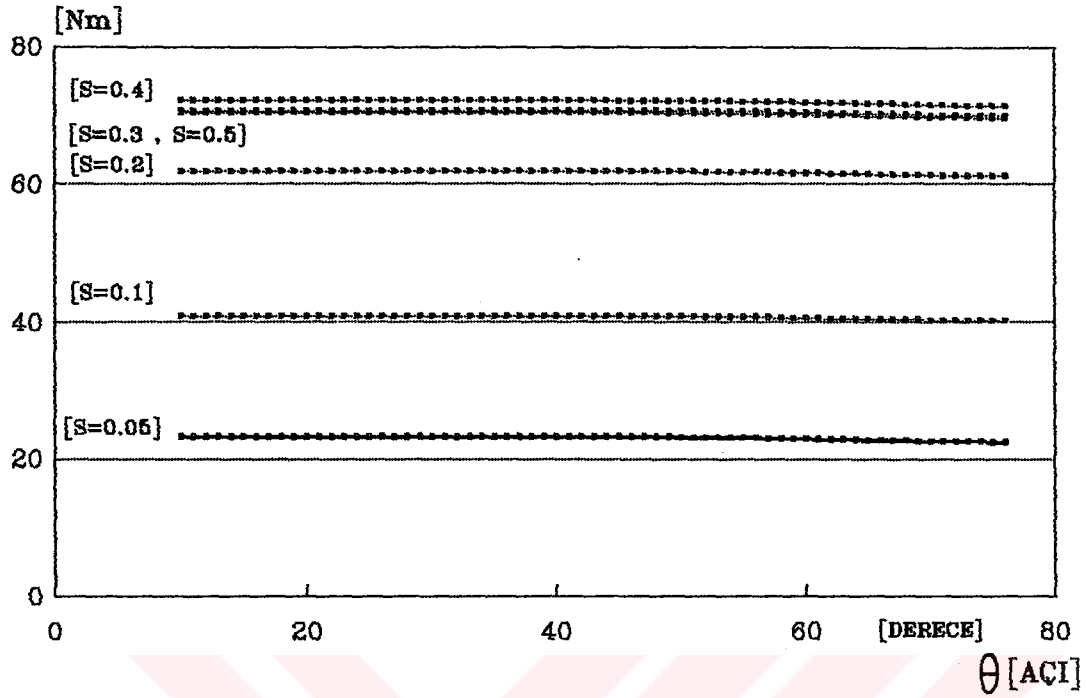
Sekil 3.16 : Dört basamaklı gerilimin değişik kaymalarda A makinasında ürettiği toplam momentin tetikleme açısı ile değişimi

MTB2



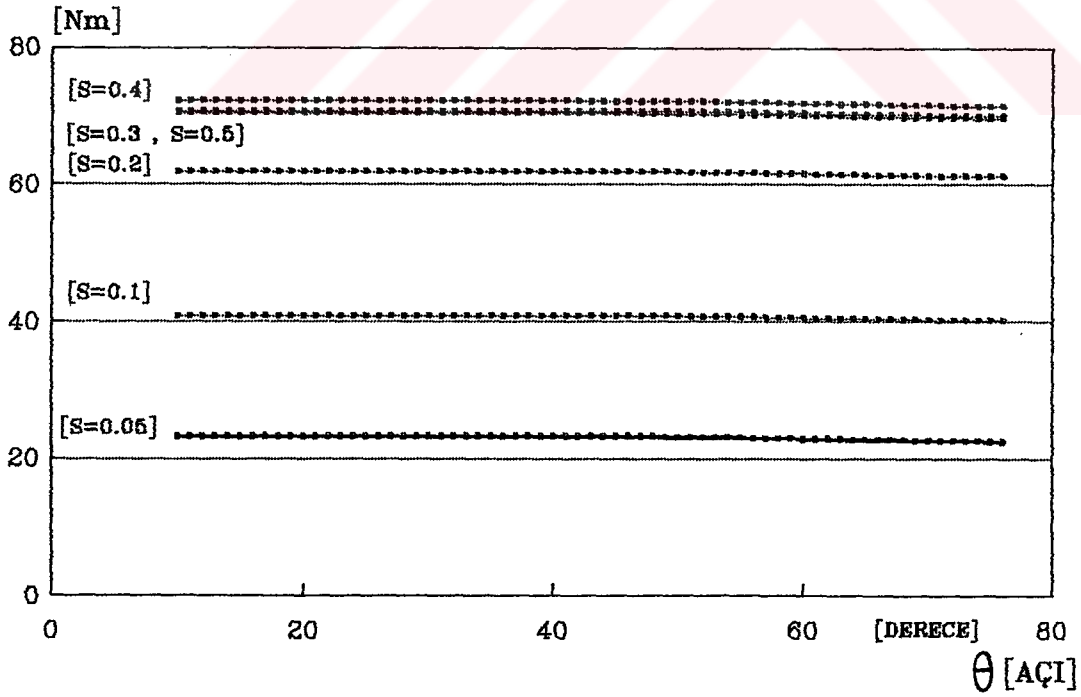
Sekil 3.17 : İki basamaklı gerilimin değişik kaymalarda B makinasında ürettiği toplam momentin tetikleme açısı ile değişimi

MTB3



Şekil 3.18 : Üç basamaklı gerilimin değişik kaymalarda B makinasında ürettiği toplam momentin tetikleme açısı ile değişimi

MTB4



Şekil 3.19 : Dört basamaklı gerilimin değişik kaymalarda B makinasında ürettiği toplam momentin tetikleme açısı ile değişimi

Yukarıdaki egrilerden de görüldüğü gibi, darbe pozisyonlarının değişimi sayesinde, harmonik geriliminde ve harmonik momentlerinde değişimler meydana gelir. Tetikleme açısının seçimi ile basamak genişlikleri ayarlanarak belirli bir kayma değerinde toplam moment ayarlanabilir.

Tablo 3.2 da 2, 3 ve 4 basamaklı dalga şekilleri için A ve B makinalarının $s = 0.05$ kayma değerinde, toplam moment değişimi aralıkları ve yüzde olarak değişimi görülmektedir. Tablolar dikkatle incelenirse 2, 3 ve 4 basamaklı dalgaların harmonik içerikleri birbirinden çok farklı olmadığı için, A ve B makinalarında elde edilen Max ve Min momentler arasındaki moment farklarının yüzde değerleri, bir makina için pratik olarak sabit kalmaktadır.

Tablo 3.2 : Toplam harmonik momentlerinin değişimi

A makinası								
2 basamaklı			3 basamaklı			4 basamaklı		
min	max	%	min	max	%	min	max	%
14.94	16.12	7.33	14.92	16.10	7.37	14.91	16.11	7.44

B makinası								
2 basamaklı			3 basamaklı			4 basamaklı		
min	max	%	min	max	%	min	max	%
22.54	23.26	3.1	22.53	23.25	3.1	22.52	23.25	3.14

Bu değişim A makinasında yaklaşık % 7.4 iken B makinası için yaklaşık % 3.1 dir. Dolayısıyla 2 basamaklı dalga yerine 3 veya 4 basamaklı dalgalarının kullanımı bizim amacımızın doğrultusunda herhangi bir avantaj sağlayamayacaktır. Daha önce DGM'li dalgaları üzerinde

yapılan çalışmalarda [6] 2, 4 ve 8 DGM'li dalga şekillerinde A ve B makinaları için yüzde olarak elde edilen moment değişimleri tablo 3.3 da verilmiştir.

Tablo 3.3 : DGM'li dalganın toplam harmonik değişimi

	A makinası			B makinası		
	2 DGM	4 DGM	8 DGM	2 DGM	4 DGM	8 DGM
$V_{dc}=750$ v	% 11.7	% 10.8	% 0.11	% 4.71	% 4.43	% 0.18
$V_{dc}=1000$ v	% 12.8	% 15.9	% 0.32	% 5.1	% 6.3	% 0.15

DGM'li dalgalarının toplam momentlerindeki yüzde olarak değişimi, bu çalışmada elde edilen değerler ile kıyaslandığı zaman, 2 ve 4 DGM'li dalgaları için elde edilen moment değişimi, basamaklı dalgaları için elde edilen değerlerden daha büyük olduğu görülür. Özellikle 4 DGM'li dalganın toplam momentte yüzde olarak oluşturduğu değişim, $V_{dc} = 1000$ v için % 15.9 dur. Bu da 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimleri için elde edilen yüzde moment değişiminden iki kat daha büyüktür. Sonuç olarak 2 ve 4 DGM'li dalgalarıyla daha etkin bir moment değişimi elde etmek mümkündür.

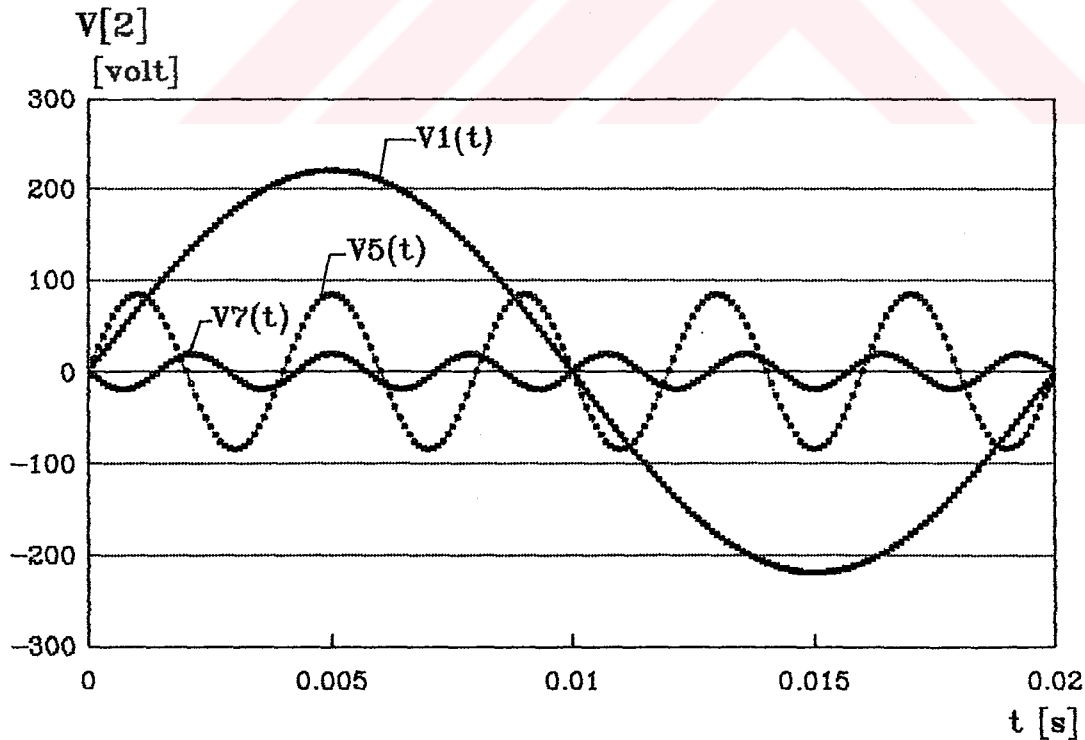
Harmonik momentleri kaymadan etkilenmediğinden, bu harmoniklerin değişik kaymalarda elde edilen toplam momentlerdeki katkıları aynıdır. İki asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin farklı olmasından dolayı, aynı kaymada elde edilen moment değerleri farklı olmakta ve $s = 0.05$ kaymasında B makinasındaki toplam moment değerleri daha büyük olmasına rağmen yüzde olarak moment değişim aralığı daha küçük kalmaktadır. Toplam moment değişimi yaklaşık 50^0 'e kadar sabit kalmaktadır ve bu açıdan sonra liner bir şekilde azamaktadır.

3.5.2 HARMONİK MOMENTLERİNİN ZAMAN İLE DEĞİŞİMİ

Asenkron makinanın terminalerine uygulanan basamaklı gerilimlerinin yapısı değiştirilerek harmonik içeriklerinin değiştiği ve genel olarak n'inci mertebeden harmonik geriliminin zamanla değişimi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$v(\omega t) = V_{nm}(\theta) \cdot \sin n\omega t \quad (3.41)$$

Burada $V_{nm}(\theta)$, (3.3) eşitliğinde gösterilen, m basamaklı, n'inci mertebeden gerilim harmoniğinin genliğini göstermektedir. $V_{nm}(\theta)$ ilk basamağın tetikleme açısı olan θ 'ya bağlıdır (diğer basamakların başlangıç tetikleme açıları θ 'ya göre düzenlenmiştir). Harmonik gerilimlerinin zaman ile değişimi $\theta=60^\circ$ için şekil 3.20 de gösterilmiştir.



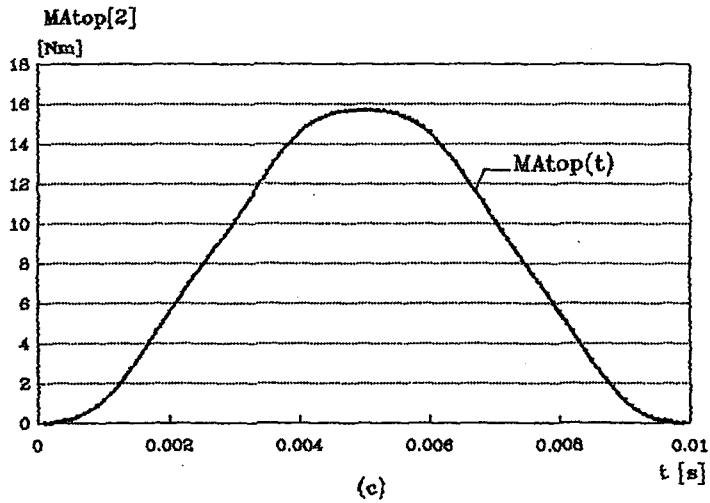
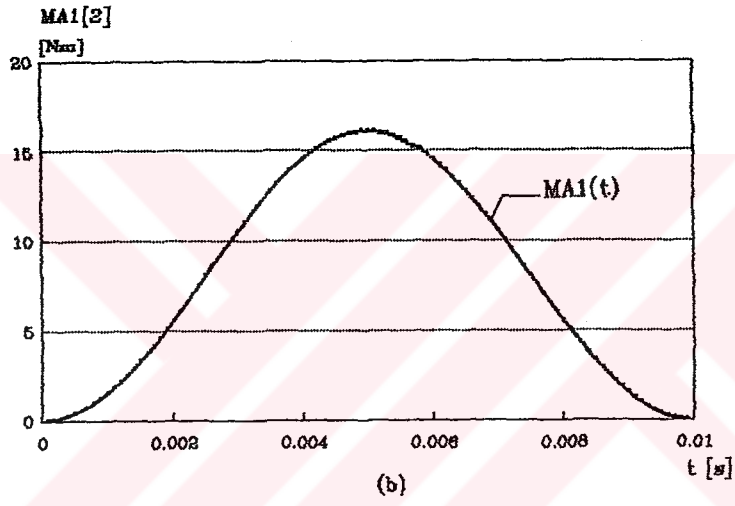
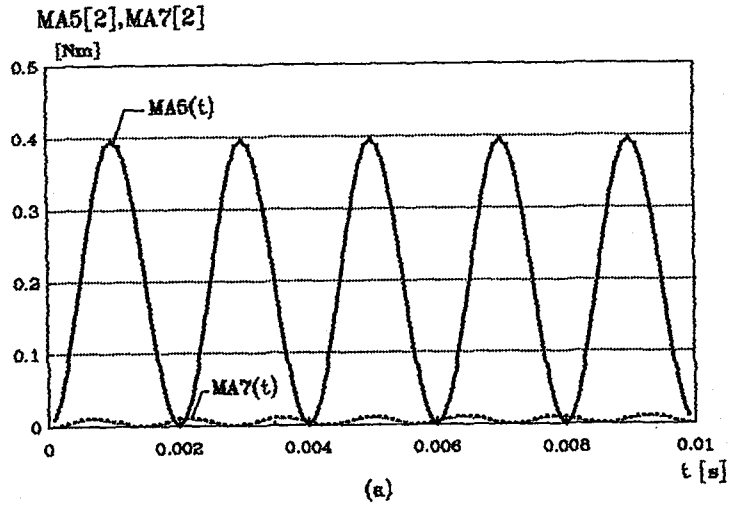
Sekil 3.20 : $\theta=60^\circ$ için 2 basamaklı çıkışın temel, 5 ve 7'inci harmonik gerilimlerinin zaman ile değişimi

Harmonik gerilimleri hava aralığında ϕ_n akılarını üretmekte ve akının zaman ile değişimi sonucunda asenkron makinanın milinde M_n momentleri endüklenmektedir.

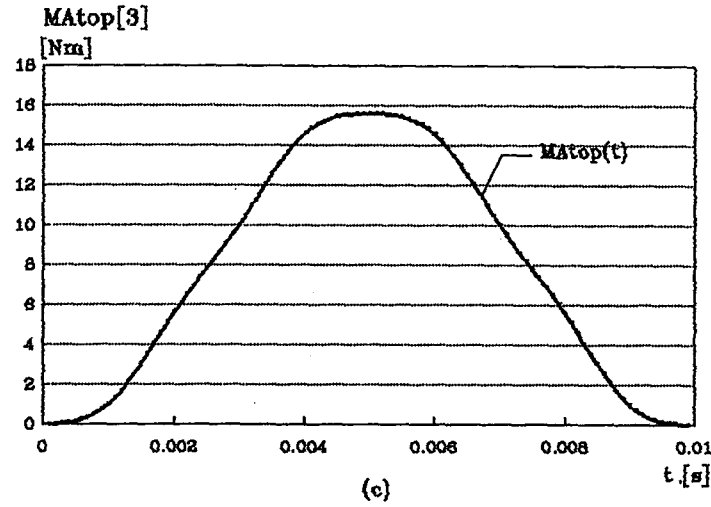
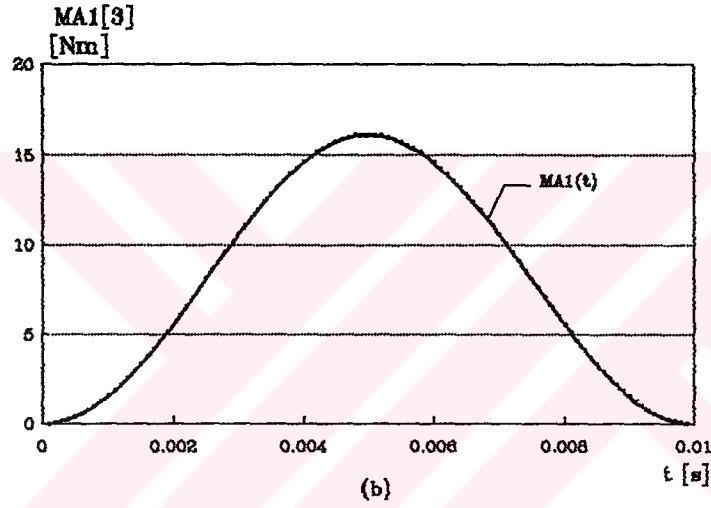
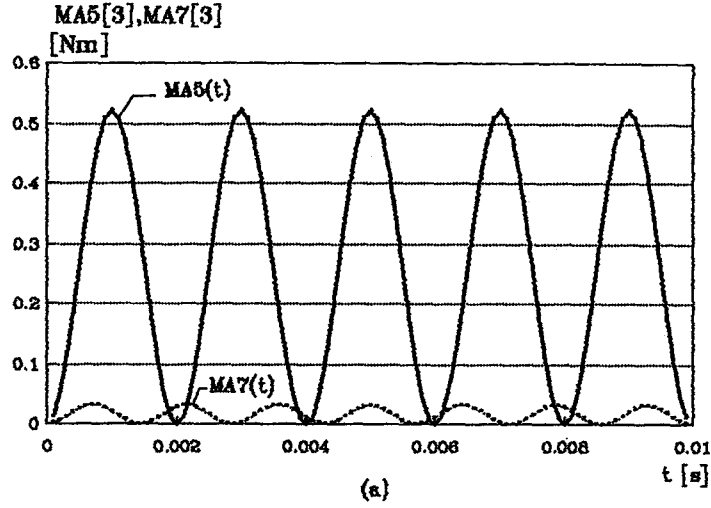
Milde endüklenen momentler gerilimin karesiyle orantılıdır ve gerilimin zaman ile değişimi sinüzoidal olduğundan, asenkron makinanın milinde endüklenen harmonik momentlerinin zaman ile değişimi sinüsün karesiyle orantılı olarak değişmektedir. Harmonik momentlerinin zaman ile değişimi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M_n(t) = K \cdot V_{nm}^2(\theta) \cdot \sin^2(n\omega t) \quad (3.42)$$

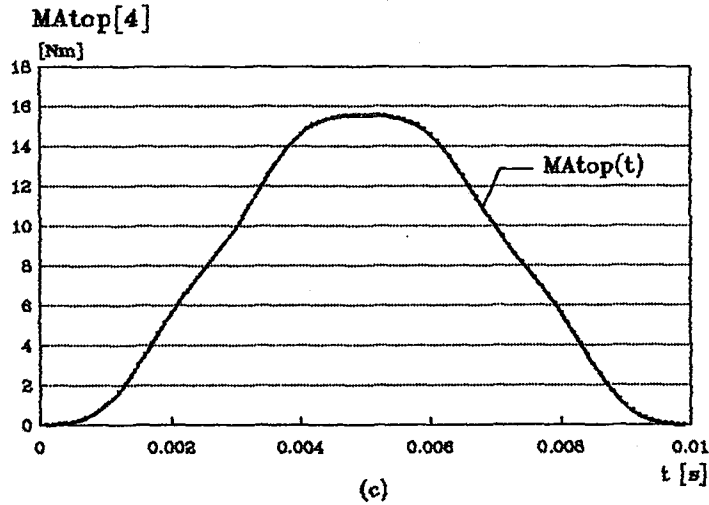
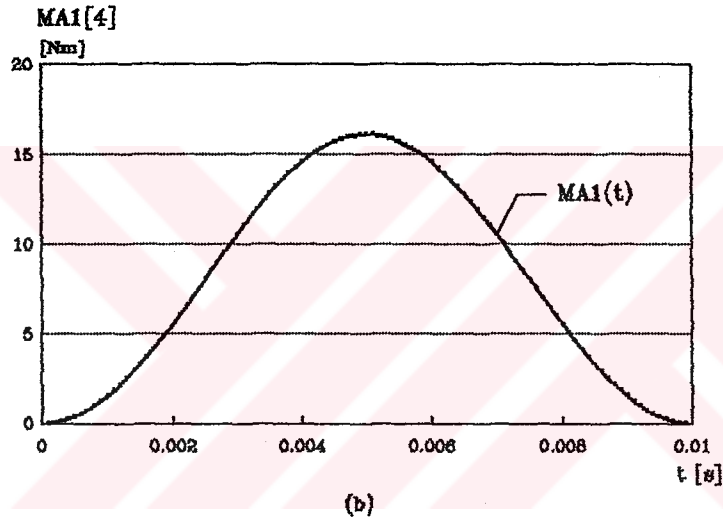
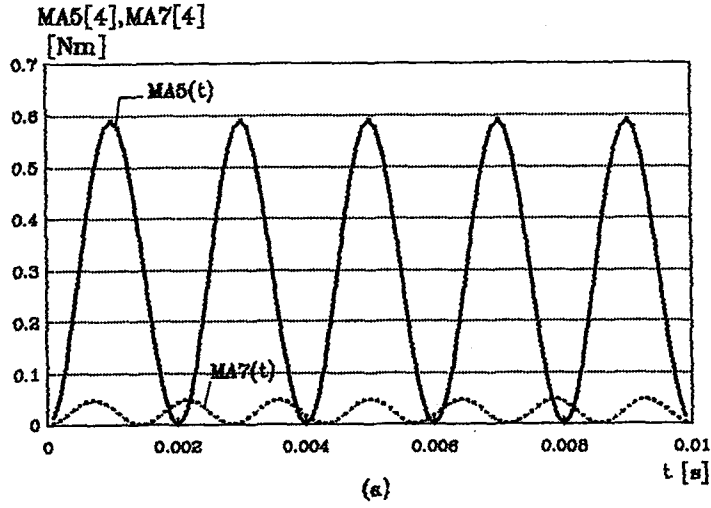
K katsayısı (3.37) eşitliği ile verilmiştir. Her harmonik için elde edilen momentin zaman ile değişiminin bir peryot boyunca ortalama değeri sıfırdan farklı olduğundan milde indüklenen toplam moment da sıfırdan farklı olacaktır. 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimlerin $\theta=60^\circ$ 'si için A makinasının milinde endüklediği 5, 7 ve temel harmonik momentlerin ve (3.36) eşitliği kullanılarak elde edilen toplam momentin zaman ile değişimi şekil 3.21, şekil 3.22 ve şekil 3.23 de gösterilmiştir. Köşeli parantez içindeki sayılar basamak sayısını gösterir.



Sekil 3.21 : İki basamaklı dalganın $\theta=60^\circ$ için, Yarım peryot boyunca harmonik momentlerinin zaman ile değişimi: a) 5'inci ve 7'inci harmonik momentleri b)temel bileşen momenti c)toplam moment



Şekil 3.22 : Üç basamaklı dalganın $\theta=60^\circ$ için , Yarım peryot boyunca harmonik momentlerinin zaman ile değişimi:a) 5'inci ve 7'inci harmonik momentleri b)temel bileşen momenti c)toplam moment



Şekil 3.23 : Dört basamaklı dalganın $\theta=60^\circ$ için, Yarım peryot boyunca harmonik momentlerinin zaman ile değişimi: a) 5'inci ve 7'inci harmonik momenleri b) temel bileşen momenti c) toplam moment

3.6 HARMONİK AKIMLARI

Bölüm 3.3 de harmonik bileşenleri için en basit eşdeğer devre kullanarak harmonik akımları için (3.31) eşitliği elde edilmiştir. Bölüm 3 de 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimleri için efektif değer olarak elde edilen (3.4), (3.5) ve (3.6) eşitlikleri, (3.31) eşitliğinde yerleştirilerek 2, 3 ve 4 basamaklı çıkışları için harmonik akımlarını gösteren I_{2n} , I_{3n} ve I_{4n} aşağıdaki gibi bulunur.

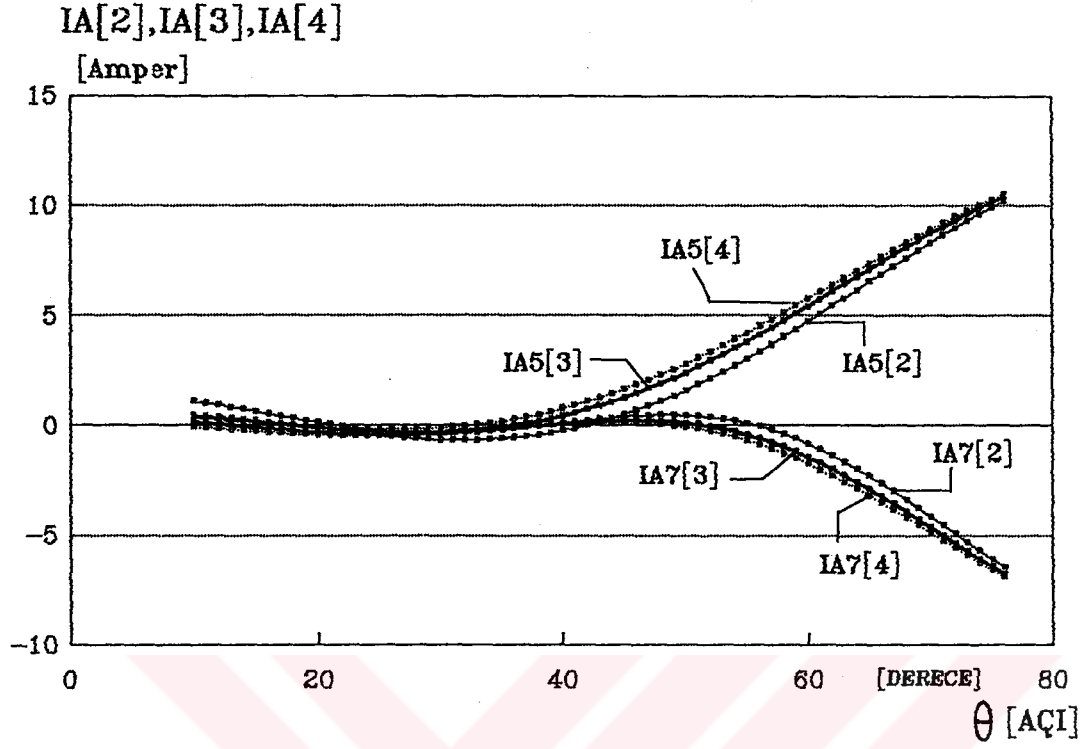
$$L = \frac{1}{\sqrt{\left((R_1 + \frac{K_{rn} \cdot R_2}{s_n})^2 + (X_1 + K_{xn} \cdot X_2)^2 \cdot n^2 \right)}} \quad (3.43)$$

$$I_{2n} = L \cdot \left(\frac{4 \cdot V_{2max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot 2} \right) \cdot \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (3.44)$$

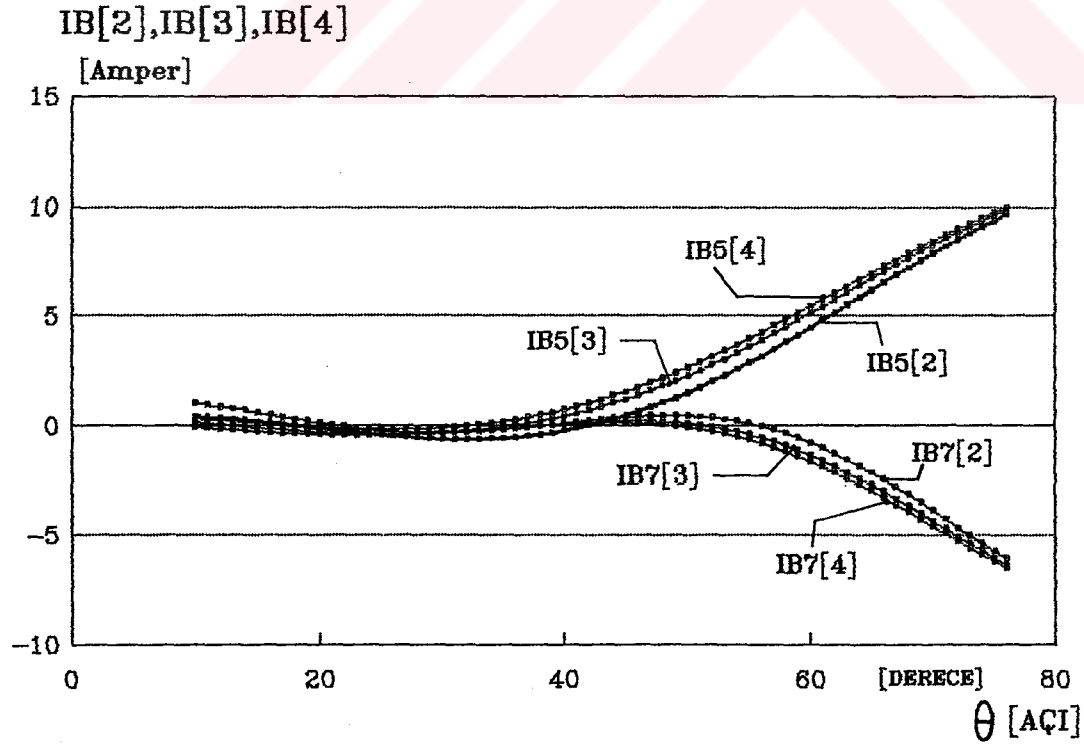
$$I_{3n} = L \cdot \left(\frac{4 \cdot V_{3max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot 3} \right) \cdot \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{2 \cdot \theta}{3} + \frac{\pi}{6} \right) + \cos n\left(\frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3} \right) \right] \quad (3.45)$$

$$I_{4n} = L \cdot \left(\frac{4 \cdot V_{4max}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot 4} \right) \cdot \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{3 \cdot \theta}{4} + \frac{\pi}{8} \right) + \cos n\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4} \right) + \cos n\left(\frac{\theta}{4} + \frac{3 \cdot \pi}{8} \right) \right] \quad (3.46)$$

(3.44), (3.45) ve (3.46) eşitlikleri kullanarak, A ve B makinaları için harmonik akımlarının tetikleme açısıyla değişimi şekil 3.24 ve şekil 3.25 de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.24 : 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimlerinin A makinasında ürettiği 5 ve 7'inci harmonik akımları



Şekil 3.25 : 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimlerinin B makinasında ürettiği 5 ve 7'inci harmonik akımları

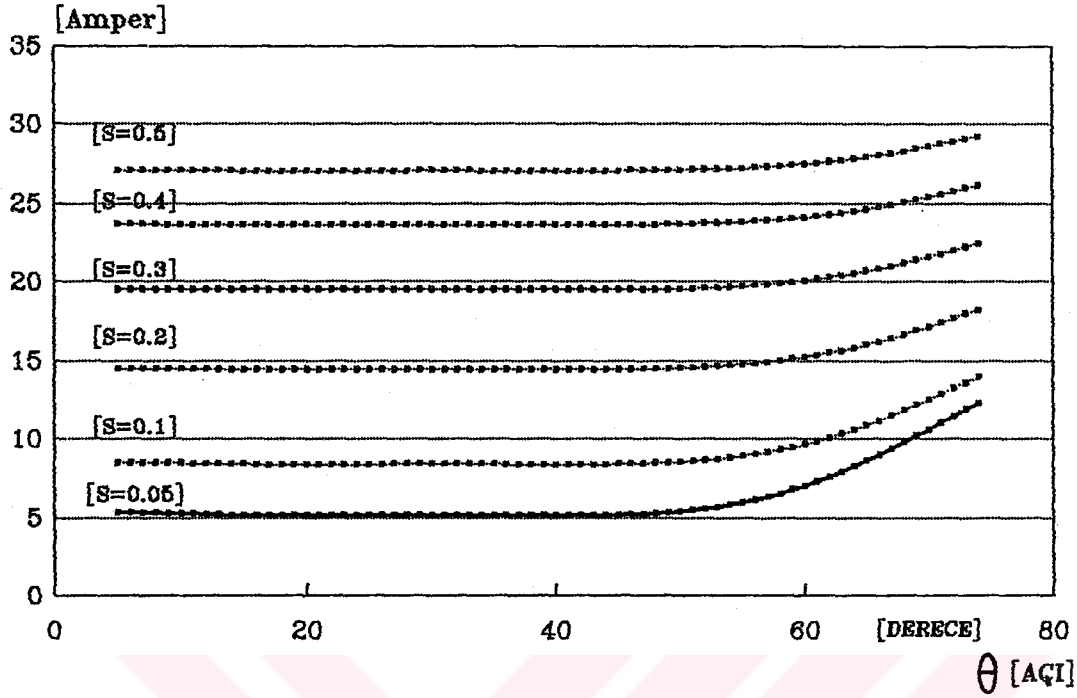
Her 3 tipi dalga için harmonik akımları, basamakların tetikleme açılarından etkilenmektedir. Eger 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimlerinin maksimum değerlerini gösteren V_{2max} , V_{3max} ve V_{4max} gerilimleri, temel gerilim 220 voltta sabit tutulacak şekilde ayarlanırsa, 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimlerin makinada meydana getirdikleri harmonik akımları basamak genişliklerinin ayarlanmasıyla değiştirilebilir. Yukarıda anlatılan koşullar çerçevesinde A ve B makinaları için harmonik akımları elde edilmiştir. Şekil 3.24 ve Şekil 3.25 dikkatle incelenirse harmonik gerilimlerinin, harmonik akımları üzerinde çok etkili olduğu sonucuna varılır, öyle ki örneğin A makinası için θ nın 60 dereceden sonraki tetikleme açılarında 5'inci harmonik akımının genliği A makinasının nominal akımını geçmektedir. $s=0.05$ kayma değerinde A ve B makina akımlarının efektif değerleri sırasıyla $I_{An}=5.12$ Amper ve $I_{Bn}=7.75$ Amper dir.

A ve B makinalarının harmonik akımları birbiriyle kıyaslanırsa, her üç tipi dalga şekli için A makinasının 5 ve 7'inci harmonik akımları, herhangi bir θ tetikleme açısında B makinasına ait olan değerlerden daha yüksektir. A ve B motorlarının toplam akımlarının efektif değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I_{top} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2} \quad (3.47)$$

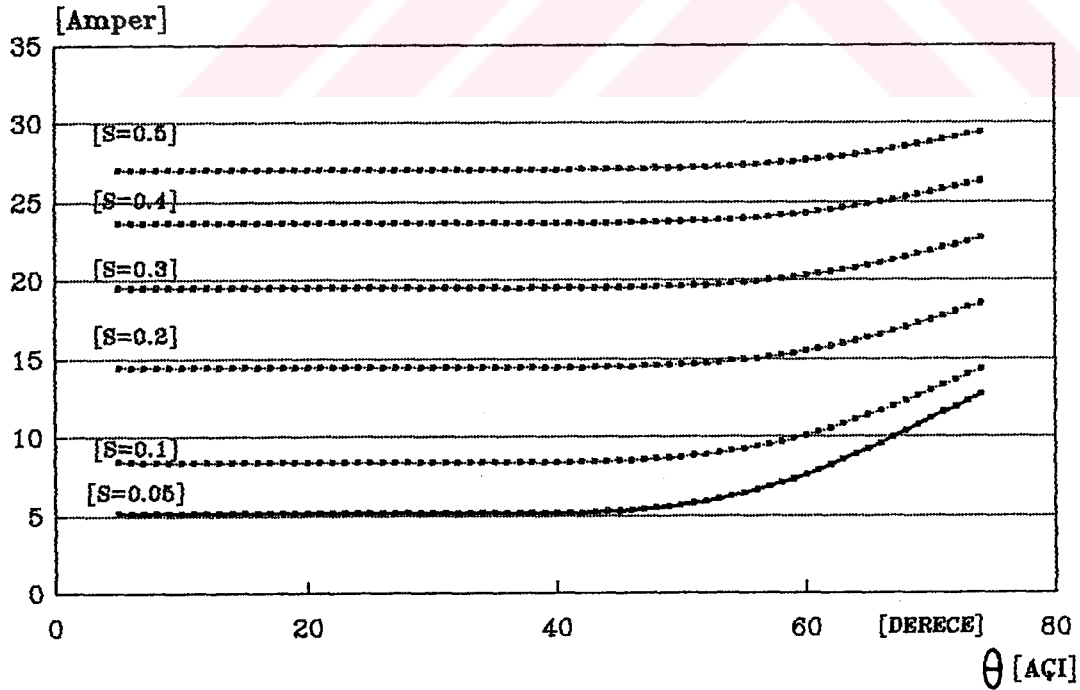
(3.47) eşitliği kullanarak A ve B makinaları için $s=0.05$ kayma değerinden $s=0.5$ değerine kadar toplam akımın tetikleme açısıyla değişimi elde edilmiştir. Bu değişimler şekil 3.26 , 3.27 , 3.28 , 3.29 , 3.30 , 3.31 'de gösterilmiştir. Bu eğrilerden de görüldüğü gibi basamak genişliğinin değişimi toplam akım üzerinde büyük değişimlere sebep olmaktadır ve bazı tetikleme açılarında nominal akım değerini aşmaktadır.

ITA2



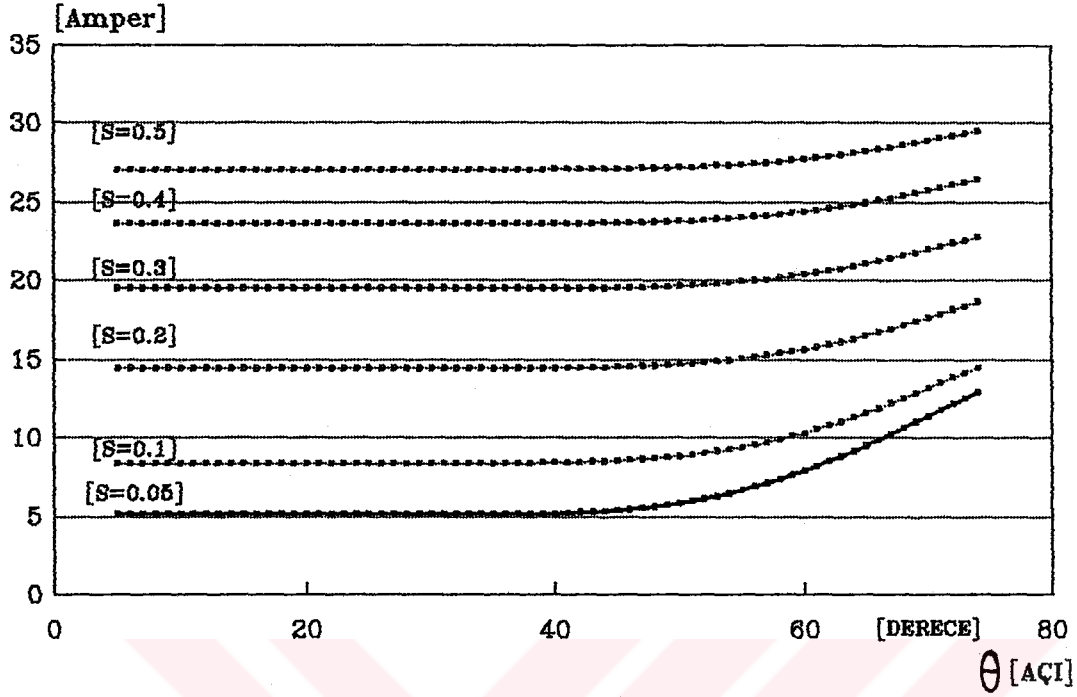
Sekil 3.26 : İki basamaklı gerilimin değişik kaymalarda A makinasında ürettiği toplam akımın tetikleme açısı ile değişimi

ITA3



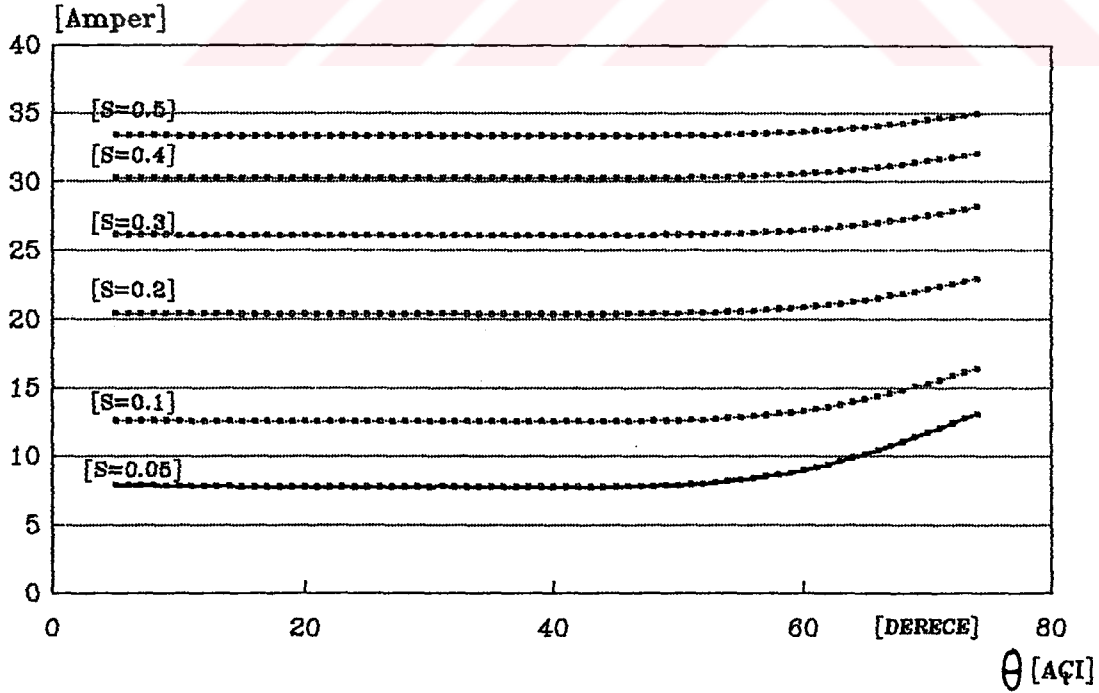
Sekil 3.27 : Üç basamaklı gerilimin değişik kaymalarda A makinasında ürettiği toplam akımın tetikleme açısı ile değişimi

ITA4



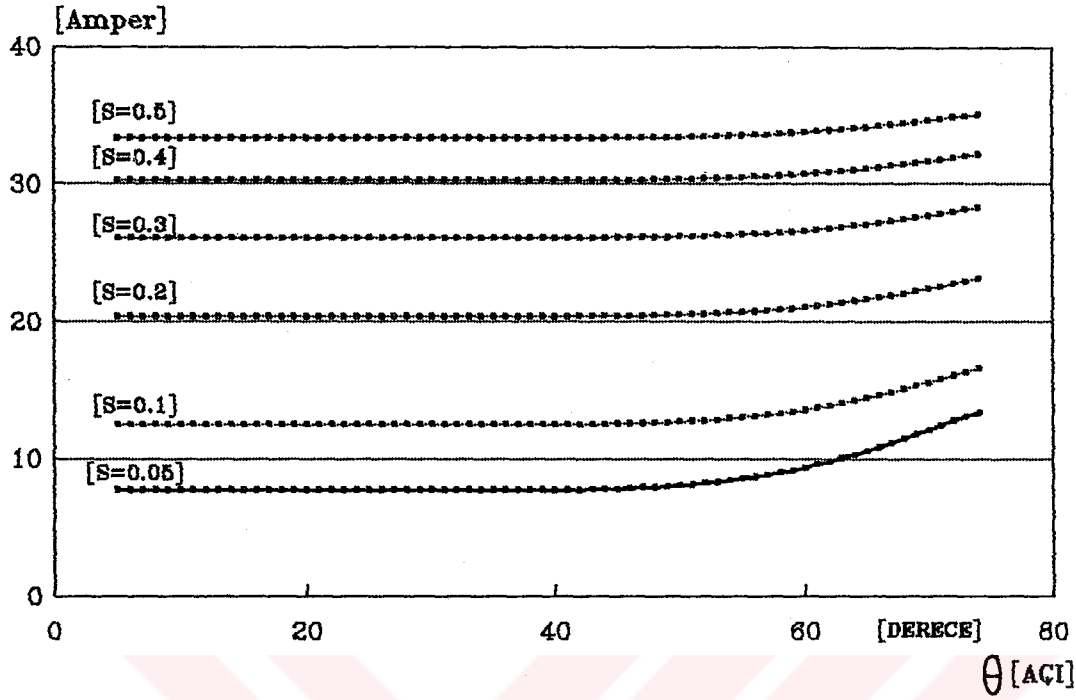
Şekil 3.28 : Dört basamaklı gerilimin değişik kaymalarda A makinasında ürettiği toplam akımın tetikleme açısı ile değişimi

ITB2



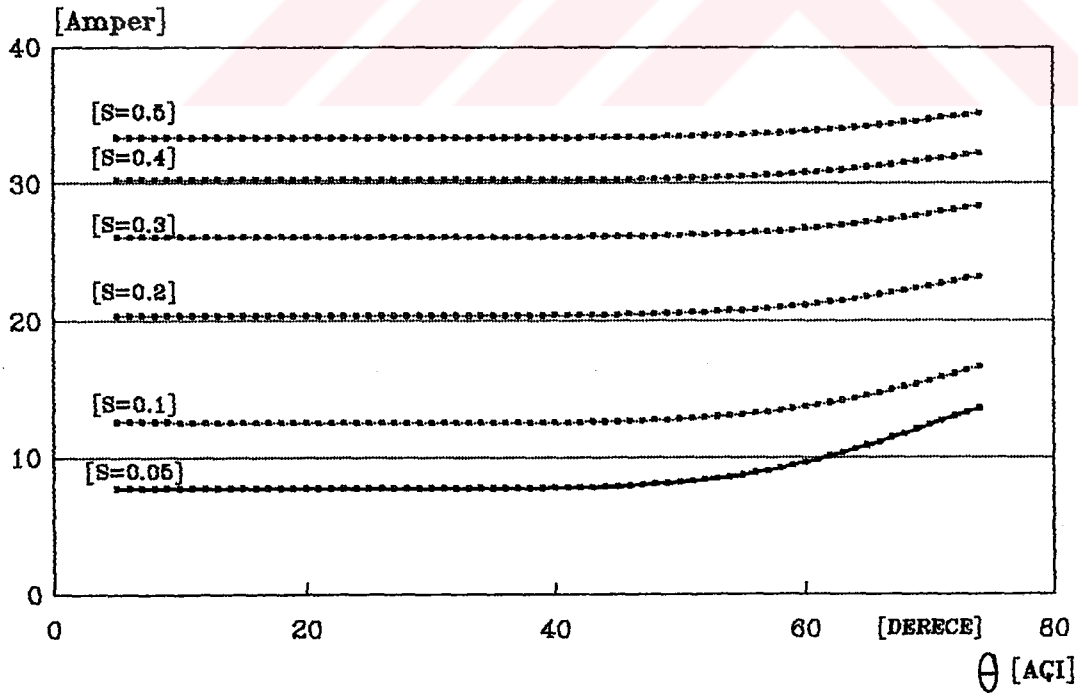
Şekil 3.29 : İki basamaklı gerilimin değişik kaymalarda B makinasında ürettiği toplam akımın tetikleme açısı ile değişimi

ITB3



Sekil 3.30 : Üç basamaklı gerilimin değişik kaymalarda B makinasında ürettiği toplam akımın tetikleme açısı ile değişimi

ITB4



Sekil 3.31: Dört basamaklı gerilimin değişik kaymalarda B makinasında ürettiği toplam akımın tetikleme açısı ile değişimi

Toplam akımın θ tetikleme açısıyla hesaplanırken, temel akım bileşeni için T eşdeğer devre, harmonik akımları için en basit eşdeğer devre gözönüne alınarak toplam akım değişimi bulunmuştur.

Aşağıdaki tablo'da 2, 3 ve 4 basamaklı dalgaları için $s=0.05$ kayma değerinde, A ve B makinalarının toplam akım değişim aralıkları ve yüzde olarak değişimi görülmektedir.

Tablo 3.4 : toplam harmonik akımlarının değişimi

A makinası								
2 basamaklı			3 basamaklı			4 basamaklı		
min	max	%	min	max	%	min	max	%
5.12	12.28	140	5.12	12.67	147	5.12	12.87	151

B makinası								
2 basamaklı			3 basamaklı			4 basamaklı		
min	max	%	min	max	%	min	max	%
7.76	13.07	68.6	7.76	13.40	72.9	7.76	13.57	75

Tablo 3.4 dikkatle incelenirse B motoruna ait, toplam akımlarının her üç dalga çıkışı için yüzde olarak değişimi, A motoruna ait olan değerlerden daha düşüktür. Bu da doğrudan eşdeğer devre parametreleriyle ilgilidir. T eşdeğer devresinin giriş uçlarından içeriye doğru bakıldığında, B motoru için elde edilen eşdeğer empedans, A motoru için elde edilen empedanstan daha küçüktür. Dolayısıyla B motoru, A motorundan daha fazla bir akım çeker. Ayrıca B motoru için şekil 3.25'de elde edilen akım harmonikleri, aynı tetikleme açılarında A motoru için

şekil 3.24'de elde edilen değerlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenlerden dolayı akım harmoniklerinin, B makinasının temel bileşen akımı üzerindeki etkisi daha azdır ve daha az bir değişime sebep olmaktadır.

Aşırı akımların makinanın aşırı ısınmasına neden olduğu ve Montsinger 'in yasasına göre yalıtkanın ömrü sıcaklıkla ters yönde üstel değiştiği bilinir.

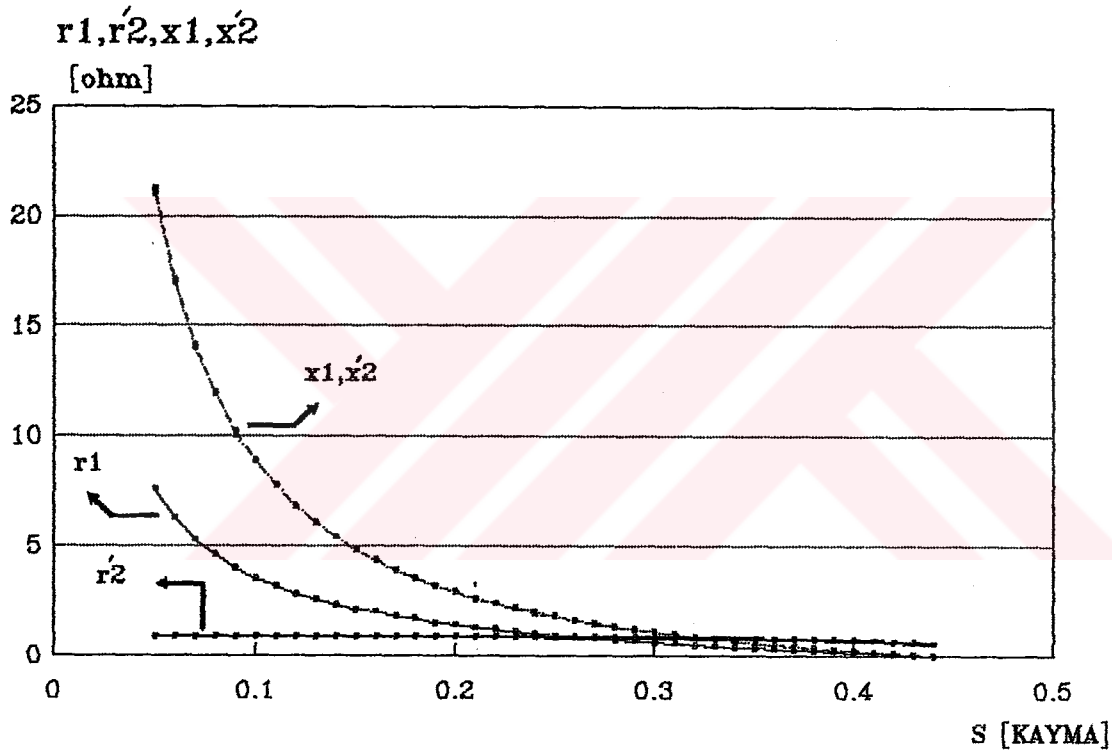
$S=0.05$ kaymasında her iki makina için elde edilen toplam akım eğrileri incelenirse, θ 'nın $0^\circ - 42^\circ$ arasındaki açılarında her üç dalga şekli için A ve B makinalarının toplam akımlarının efektif değerleri yaklaşık olarak makinalarının nominal akımlarına eşittir. 42° den sonraki açı değerlerinde her iki makinanın toplam akımları hızla artmaktadır.

Sonuç olarak θ nın 42° den daha büyük tetikleme açılarında, basamak genişliklerinin ayarlanmasıyla elde edilen dalgalar, makinalarda aşırı akımlarına neden olmaktadır ve aynı zamanda aşırı akıma sebep olmayan açı aralıklarında oluşturulan basamaklı dalgaların toplam moment üzerinde etkileri çok azdır.

3.7 İKİ MAKINANIN ÇIKIŞ MOMENTLERİNİN EŞİTLENMESİ İÇİN EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİNİN DEĞİŞİMİ

Aynı kaymada A ve B makinalarının çıkış momentleri birbirine eşit olmadığı ve bu farkın, makina terminallerine uygulanan dalga şeklinin yapısı değiştirilerek azalmasına rağmen tam olarak sifıra eşitlenmesi mümkün olmadığı bölüm 3.5.1 de gösterilmiştir. Basamaklı dalgayı oluşturan θ_k açıları, makina için zararlı olan aşırı akıma yol açmıyacak şekilde oluşturulduğunda, toplam harmonik momentleri toplam moment üzerinde ancak % 0.2

civarında etkili olacaktır. Bu nedenle B makinasının çıkış momentinin A makinasının çıkış momentine eşitlenmesi için harmonik momentlerinin bir etkisi olmadığı ve dolayısıyla da eklenmesi gereken parametrelerin tetikleme açısından etkilenmediği kabul edilmiştir. Şekil 3.32 0-0.45 kayma değerleri arasında, iki makinanın çıkış momentlerinin birbirine eşitlenmesi için B makinasının eşdeğer devresine eklenmesi gereken direnç ve reaktanslarının kayma ile değişimi gösterilmiştir.

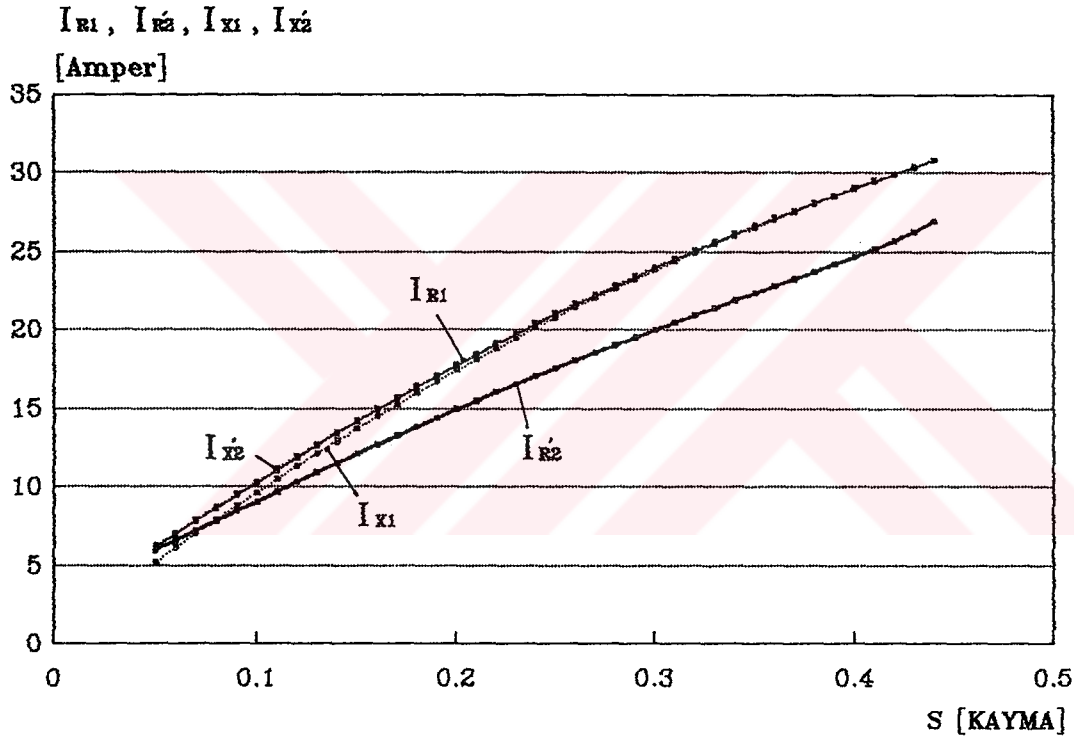


Şekil 3.32 : $M_B=M_A$ koşulunu sağlamak için B makinasının eşdeğer devresine eklenmesi gereken direnç ve reaktanslarının kayma ile değişimi

Şekilden de görüldüğü gibi rotora eklenmesi gereken direncin diğer parametreleri yanında kayma ile pek fazla değişmediği görülür. Buna karşın statora eklenmesi gereken direncin kaymadan çok etkilendiği ve kaymanın artışıyla azaldığı görülür. Statora ve rotora eklenmesi gereken reaktanslarının değişimi aynı ve kaymanın artışıyla üstel bir biçimde azalmaktadır. Bu grafiklerden de

görüldüğü gibi ister değer bakımından ister değişmezliği açısından $M_b = M_A$ şartını sağlamada, rotor r_2 direncinin değişimi daha uygundur.

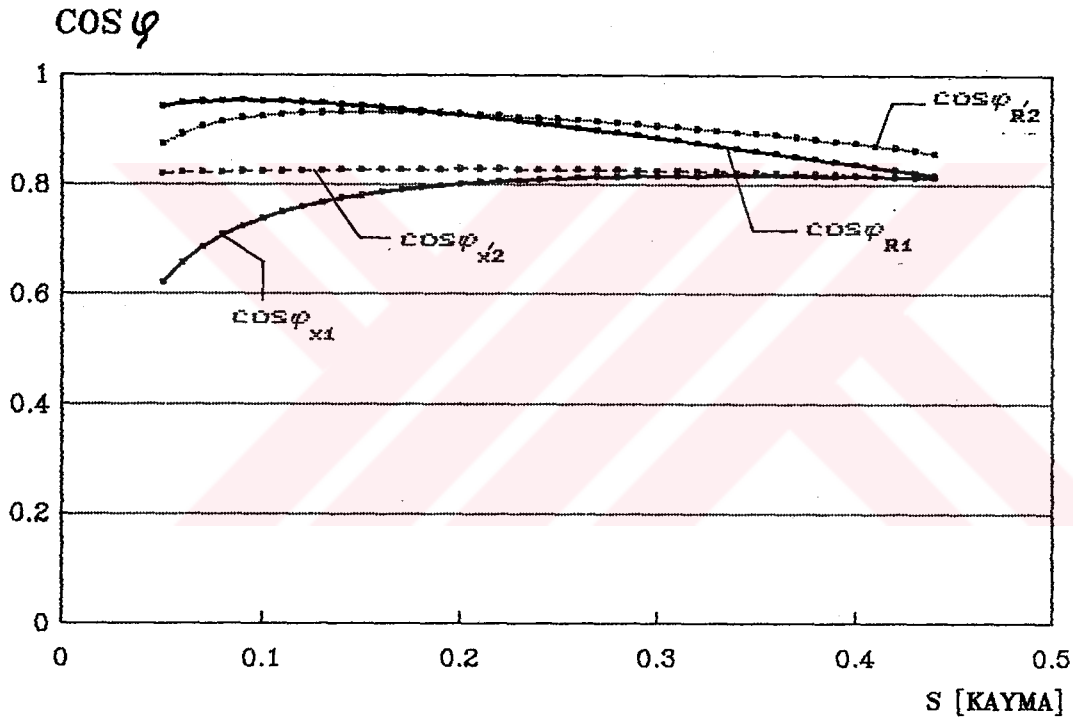
Bir asenkron makinanın şebekeden çektiği akım kayma değerinden etkilenmektedir. Eşdeğer devre terminalerinden içe doğru bakıldığında görülen Z eşdeğer empedansı kaymanın artışıyla küçüldüğünden, şebekeden çekilen akım kaymanın artışıyla artmaktadır.



Sekil 3.33 : B makinasının şebekeden çektiği akımın kayma ile değişimi

Sekil 3.33, B makinasının şebekeden çektiği akımın kayma ile değişimi, eşdeğer devre parametrelerinden nasıl etkilendiğini gösterir. Bu eğrileri elde etmek için herhangi bir s kayması için $M_b = M_A$ koşulunu sağlayan R_1, R_2, X_1 ve X_2 direnç ve reaktansları bulunarak aynı kayma değerlerinde her bir parametre için akım değerlerinin kayma ile değişimi bulunmuştur.

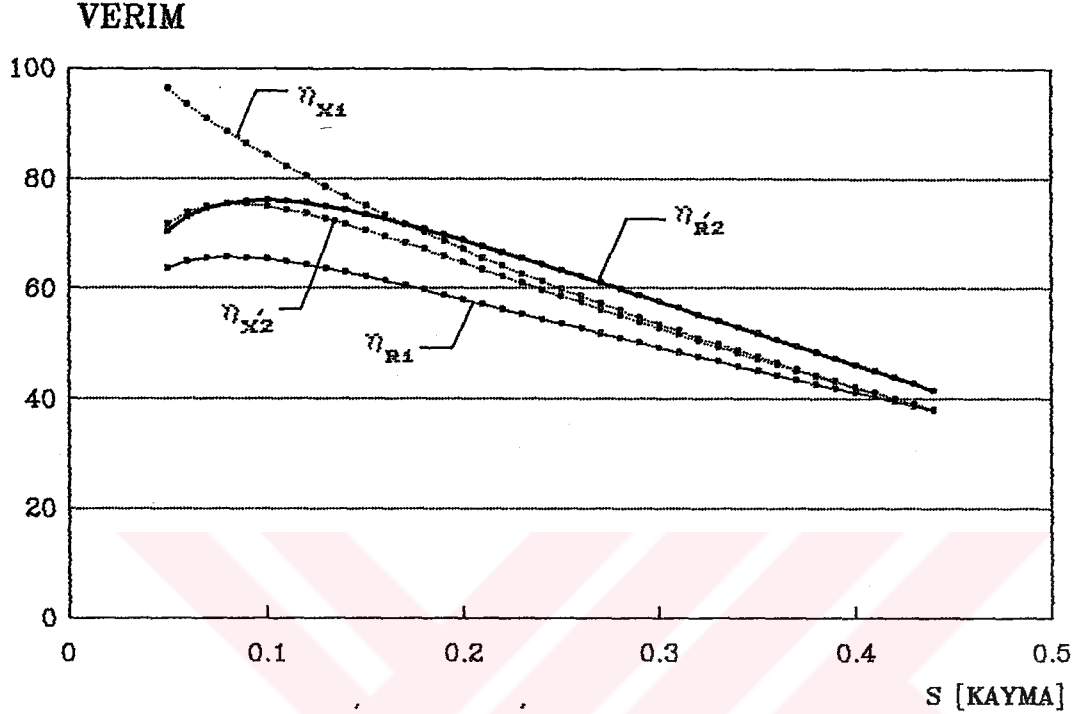
Güç katsayısı asenkron makinasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu büyüklük makinanın aldığı görünür gücün hangi oranda enerji dönüşümüne katıldığını gösterir. Güç katsayısının büyük değerleri daima arzu edilir, zira tepkin güç yararlı güce katkıda bulunmaz, ancak bağlantı hatlarını yükler ve kayıpları arttırır. Şekil 3.34 $M_b = M_A$ şartını sağlayan R_1, R_2, X_1 ve X_2 değerlerinin değişimiyle her bir parametre için güç katsayısının kayma ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.34 : R_1, R_2, X_1 ve X_2 değerlerinin değişimiyle her bir parametre için güç katsayısının kayma ile değişimi

Şekil 3.34 den görüldüğü gibi eşdeğer devresine reaktans bağlanmasıyla makinanın güç katsayısı düşmektedir ve bu da belirli kayma değerlerinde aynı çıkış gücü elde etmek için şebekeden daha fazla akımın çekileceği anlamına gelir. Ayrıca aynı şekilden görüldüğü gibi aynı kayma değerinde aynı çıkış gücü elde etmek için, R_1, R_2, X_1 ve X_2 eşdeğer devre parametreleri arasında, R_2 şebekeden en az

akımın çekilmesini sağlayan elemandır.



Şekil 3.35 : R_1, R_2, X_1 ve X_2 değerlerinin değişimiyle her bir parametre için makina veriminin kayma ile değişimi

Asenkron makina şebekeden P_1 gücü alır ve milinden P_2 gücü verir. Bir makinanın verimi milden verdiği gücün aldığı elektrik gücüne oranıdır. $M_a = M_a$ koşulunu sağlayan her eşdeğer devre parametresi için B makinasının veriminin kayma ile değişimi şekil 3.35 de gösterilmiştir. Şekildeki eğriler incelenirse düşük kaymalarda en yüksek verimin X_1 'in değişimi ile elde edilir, fakat ister maliyet açısından ister küçük güç katsayısı açısından seçilmesi uygun değildir. X_1 den sonra en büyük verim R_2 için elde edilir ve X_1 den sonra bütün kayma değerleri için diğer parametrelere nazaran daha yüksek bir verim sağlar. Dolayısıyla ister şebekeden çektiği akım ister güç katsayısı ve verim açısından, B makinasının çıkış momentinin A makinasının çıkış momentine eşitlenmesi için bilezikli makinalarının rotor devresine direnç eklenmesi en uygun çözümdür.

BÖLÜM 4 : SONUÇ

Bu çalışmada basamaklı dalga ile beslenen asenkron makinanın harmonik akımları, harmonik momentleri ve bunların toplam akım ve moment üzerindeki etkileri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Şekil 3.6, şekil 3.7 ve şekil 3.8 de basamak gerilimlereinin sabit kalması durumunda, θ tetikleme açısının 0 dereceden 90 dereceye doğru artırıldığında (θ ilk basamağın başlangıç tetikleme açısını göstermekte ve diğer basamakların tetikleme açıları θ 'ya göre düzenlenmiştir) 5 ve 7'inci harmonik gerilimlerinin yanında makina terminallerine uygulanan temel gerilim bileşeni de 220 v'tan 0 değerine düşmektedir.

2. Temel bileşen gerilimin 220 v'ta sabit kalması için basamak gerilimleri θ nın artışıyla artar. bu değişim 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimleri için şekil 3.9 da gösterilmiştir.

3. Harmonik gerilimlerinin içeriği hakkında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (şekil 3.10).

a) İki basamaklı gerilim dalgası için θ nın $10^\circ - 20^\circ$ ve $41^\circ - 45^\circ$ arasındaki açılarda 7'inci harmonik genliklerinin mutlak değerleri 5'inci harmonik genliklerinden daha büyük iken bu açı aralıkları üç basamaklı gerilim dalgası için $16^\circ - 37^\circ$ ve dört basamaklı gerilim dalgası için $13^\circ - 35^\circ$ dir.

b) θ nın 40° den sonraki tetikleme açılarında 5'inci harmonik gerilimleri hızlı bir şekilde pozitif

değerlerde artarken 7'inci harmonik gerilimleri negatif değerlerde artmaktadır.

c) Her üç tipi dalga şekli için 5'inci ve 7'inci harmonik gerilimlerinin sıfır olduğu açıları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

	2 BASAMAKLI	3 BASAMAKLI	4 BASAMAKLI
5.HAR.	$18^{\circ}, 42^{\circ}$	$18^{\circ}, 36^{\circ}$	$18^{\circ}, 32^{\circ}$
7.HAR.	$21^{\circ}, 39^{\circ}, 56^{\circ}$	$13^{\circ}, 39^{\circ}, 51^{\circ}$	$39^{\circ}, 49^{\circ}$

4. θ açılarının ayarlanmasıyla harmonik momentlerinin azaltılabileceği ve arttırılabileceği görülmektedir. Şekil 3.12 ve şekil 3.13 da gösterilen A ve B makinalarının harmonik içeriği hakkında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

a) Her iki makinada da, her üç tipi dalga çıkışı için 5'inci harmonik momentinin genliği θ nın yaklaşık 40 derecesine kadar sıfırken bu açı 7'inci harmonik için 59° dir.

b) Her üç dalga tipinde, bütün θ tetikleme açılarında 5'inci harmonik momentlerinin genlikleri 7'inci harmonik momentlerinin genliklerinden daha büyüktür.

c) Makinalarının eşdeğer devre parametrelerinden dolayı Harmonik momentleri A makinasında daha etkilidir.

5. Basamak gerilimlerinin pozisyonu değiştirilerek, kayma değiştirmeksizin, toplam çıkış momenti değiştirebilir olmasına rağmen , A ve B makinalarının birbiri ile yedeklenmesi durumunda önceki çalışma şartlarını sağlamada yeterli değildir. Başka bir değişle basamaklı

dalgalar, A ve B makinalarının çıkış momentlerinin farkını kapatacak kadar toplam harmonik momenti üretemeyecektir.

6. 2, 3 ve 4 basamaklı dalganın harmonik içerikleri birbirinden çok farklı olmadığı için, A ve B makinalarında elde edilen Max ve Min momentleri arasında moment farklarının yüzde değerleri, bir makina için pratik olarak sabittir. Her üç dalga tipi için bu farkın yüzde değeri A makinası için % 7.4 iken B makinası için % 3.1 dir (tablo 3.2).

7. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, DGM'li dalgaları için yapılan çalışma [6] ile karşılaştırıldığında, 2 ve 4 DGM'li dalgalarıyla daha etkin bir moment değişimi elde etmek mümkün olduğu sonucu elde edilir (tablo 3.2 ve tablo 3.3).

8. Harmonik gerilimlerinin toplam moment üzerinde fazla etkili olmamasına karşın toplam akım üzerinde son derece etkilidir.

9. $s=0.05$ kaymasında, her üç dalga şekli için , A makinasının akım değişiminin yüzde değerleri % 140 larda iken bu değer B makinası için % 70 lardadır. Dolayısıyla harmonik akımları A makinasında daha etkilidir.

10. Harmonik akımları ve harmonik momentleri sadece θ tetikleme açılarına bağlı değil, aynı zamanda bu büyüklükler makinanın eşdeğer devre parametrelerinden de etkilenmekte ve farklı firmalar tarafından üretilen ve aynı temel büyüklüklere sahip olan iki makinadan, reaktansları daha küçük olan makinada harmonik akımları ve harmonik momentleri daha etkilidir.

11. A ve B makinalarının çıkış momentlerinin eşitlenmesi için B makinasının eşdeğer devresine eklenen R_2 dışındaki parametreler, s kaymasından çok etkilenmekte ve ister değer ister verim ve güç katsayısı açısından, $M_B = M_A$ şartını sağlamada R_2 nun değiştirilmesi en uygun çözümü vermektedir .

KAYNAKLAR

- [11] ENJETI P.N., LINSAY J.F., Steady State and Transient Behavior of PWM Inverter Fed Induction Motor, Elect. Mach. and Pow. Sys., 16, 1-3 (1989).
- [12] BOYS J.T., WALTON S.J., A Loss Minimised PWM Inverter, IEE Proc. B, 132, 260-268, Sep (1985).
- [13] MERGEN A.F., Contributions to The Methods of Analysis of PWM Voltage Waveforms, Bull. Tech. Univ. Istanbul, 42, 2, 201-214 (1989).
- [14] KUNGSHIRN E.A., JORDAN H.E., Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources, IEEE Trans. Pow. App. Sys., 624-631 March (1968).
- [15] MERGEN A.F., A Metod of Calculation on Optimisation and Elimination of PWM Voltage Waveform Harmonics Exist in an Induction Motor Drive, Bull. Tech. Univ. Istanbul, 42, 4, 557-574 (1989).
- [16] KIYI M., DGM'li Dalgalarıyla Beslenen Asenkron Motorlarda Harmoniklerin Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Fakültesi Yüksek Lisans Tezi Ocak (1992).
- [17] KUTMAN T., Güç Elektroniği Devrelerinde Genel Bir Analiz Yöntemi ve Küçük Distorsiyonlu Yeni Bir Inverter, İstanbul teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Doktora Tezi (1976).
- [18] BASHIR A., PRADHAN B.D., REVANKAR G.N., An Improved stepped Wave Current Source Inverter, International Journal of Electronics, Vol 54, Iss 5, pp 595-613, (1983).
- [19] BASHIR A., PRADHAN B.D., REVANKAR G.N., Voltage Control in 3-phase Stepped-Wave Inverters, International Journal of Electronics, Vol 54, Iss 3, pp 453-470, (1983).
- [10] SRIRAGHAVAN S.M., PRADHAN B.D., REVAKAR G.N., Multistage 3-phase Controlled Stepped-wave Inverter System, International Journal of Electronics, Vol 56, Iss 1, pp 95-103 (1984).

- [11] LISSACK T., APPELBAUM J., Stepped Voltage DC/AC Inverter, IEEE Trans. Ind. Electronics and Control Instrumentation, IECI-24, 2 (May 1977) 192-199.
- [12] TURNABELL F.G., Selected Harmonic Reduction in Static DC-AC Inverter, IEEE Trans. pp 63-1011 (1963).
- [13] BEDFORD B.D., HOFT R.G., Principles of Inverter Circuits, NewYork, Wiley, 1964.
- [14] COREY P.D., Methods for Optimizing The Waveform of The Stepped-Wave Static Inverters, AIEE Trans. cp 62-1147, Denver, 1962.
- [15] FLAIRTY C.W., A 50 kVA Adjustable-Frequency 24-phase controlled Rectifier Inverter, AIEE Industrial Electronics Symposium, Boston, Sep. 1961.
- [16] MERGEN A.F., Effects of Supply Voltage Waveforms Upon Iron Losses in an Induction Motor, Bull. Tech. Univ. Istanbul Vol.43, 1, pp 9-21, 1990.
- [17] MERGEN A.F., The Effects of Equivalent-Circuit Parameters in PWM controlled Induction-motors I Istanbul Technical Univ.
- [18] KOSTENKO M., PIOTROVSKY L., Electrical Machines Vol. II Mir Publishers, Moscow (1969).

EKA:

{2,3 ve 4 BASAMAKLI GERILIMLERININ HARMONIK ANALIZI}

PROGRAM DCMOTOR_SIM;

Uses crt;

Var

GERG2:TEXT;
GERG3:TEXT;
GERG4:TEXT;
GER2:TEXT;
GER3:TEXT;
GER4:TEXT;
GER234:TEXT;
GEREV:TEXT;

I,F:integer;

X44,X34,X24,X33,X23,X22,X11,V12g,V52g,V72g,V13g,V53g,
V73g,V14g,V54g,V74g,V12,V52, V72,V13,V53,V73,V14,V54,
V74,Vbas2,Vbas3,Vbas4,L2,L3,L4:REAL;

Const

W = 314.16;
K2= 128.87;
K3= 92.985;
K4 = 73;
P=2;

Begin

ASSIGN(GERG2,'GERG2.DAT');
REWRITE(GERG2);
ASSIGN(GERG3,'GERG3.DAT');
REWRITE(GERG3);
ASSIGN(GERG4,'GERG4.DAT');
REWRITE(GERG4);
ASSIGN(GER2,'GER2.DAT');
REWRITE(GER2);
ASSIGN(GER3,'GER3.DAT');
REWRITE(GER3);
ASSIGN(GER4,'GER4.DAT');
REWRITE(GER4);
ASSIGN(GER234,'GER234.DAT');
REWRITE(GER234);
ASSIGN(GEREV,'GEREV.DAT');
REWRITE(GEREV);

Clrscr;

I:=10;
if I=10 then V12:=0;
if I=10 then V52:=0;
if I=10 then V72:=0;
if I=10 then V13:=0;
if I=10 then V53:=0;

```
if I=10 then V73:=0;
if I=10 then V14:=0;
if I=10 then V54:=0;
if I=10 then V74:=0;
REPEAT

X11:=I* 0.017453;
X22:=(X11/2) + 0.7854;
X23:=((2*X11)/3)+0.5236;
X33:=(X11/3)+1.0472;
X24:=((3*X11)/4) + 0.3927;
X34:=(X11/2) + 0.7854;
X44:=(X11/4) + 1.1781;
V12g:=(1/1)*(COS(X11)+cos(X22));
V12g:=K2*V12g;
V52g:=(1/5)*(COS(5*X11)+cos(5*X22));
V52g:=K2*V52g;
V72g:=(1/7)*(COS(7*X11)+cos(7*X22) );
V72g:=K2*V72g;
V13g:=(1/1)*(COS(X11)+cos(X23)+COS(X33));
V13g:=K3*V13g;
V53g:=(1/5)*(COS(5*X11)+cos(5*X23)+COS(5*X33));
V53g:=K3*V53g;
V73g:=(1/7)*(COS(7*X11)+cos(7*X23)+COS(7*X33));
V73g:=K3*V73g;
V14g:=(1/1)*(COS(X11)+cos(X24)+COS(X34)+COS(X44));
V14g:=K4*V14g;
V54g:=(1/5)*(COS(5*X11)+cos(5*X24)+COS(5*X34)+COS(5*X44));
V54g:=K2*V54g;
V74g:=(1/7)*(COS(7*X11)+cos(7*X24)+COS(7*X34)+COS(7*X44));
V74g:=K2*V74g;
L2:=(220/V12g);
L3:=(220/V13g);
L4:=(220/V14g);
V12:=L2*V12g;
V52:=L2*V52g;
V72:=L2*V72g;
V13:=L3*V13g;
V53:=L3*V53g;
V73:=L3*V73g;
V14:=L4*V14g;
V54:=L4*V54g;
V74:=L4*V74g;
Vbas2:=L2*143.14;
Vbas3:=L3*103.28;
Vbas4:=L4*81.0834;
writeln(GERG2,I,V12g,V52g,V72g);
writeln(GERG3,I,V13g,V53g,V73g);
writeln(GERG4,I,V14g,V54g,V74g);
writeln(GER2,I,V12,V52,V72);
writeln(GER3,I,V13,V53,V73);
writeln(GER4,I,V14,V54,V74);
writeln(GER234,I,V52,V72,V53,V73,V54,V74);
writeln(GEREV,I,Vbas2,Vbas3,Vbas4);
```

```
inc(I,1);  
F:= 77-I;  
UNTIL F=0;  
close(GERG2);  
close(GERG3);  
close(GERG4);  
close(GER2);  
close(GER3);  
close(GER4);  
close(GEREV);  
close(GER234);  
end.
```

```
{ 2,3 ve 4 BASAMAKLI KARE DALGA GERILIMLERININ URETTIGI}  
{ 5 ve 7'inci MOMENT HARMONIKLERININ DEGISIK KAYMA}  
{ DEGERLERINDE TEMEL MOMENT UZERINDEKI ETKISININ ANALIZI}
```

```
PROGRAM DCMOTOR_SIM;
```

```
Uses crt;
```

```
Var
```

```
MTB2:TEXT;  
MTB3:TEXT;  
MTB4:TEXT;  
MTA2:TEXT;  
MTA3:TEXT;  
MTA4:TEXT;  
MA234:TEXT;  
MB234:TEXT;
```

```
I,F:integer;
```

```
Gd,Gm,Erc:integer;
```

```
X44,X34,X24,X33,X23,X22,X11,V12,V52,V72,V13,V53,V73,  
V14,V54,V74,V2max,V3max,V4max,L2,L3,L4,MA52,MA72,  
MA53,MA73,MA54,MA74,MA1,MA2,MA3,MA4,MA5,MA6,MAT12,  
MAT22,MAT32,MAT42,MAT52,MAT62,MAT13,MAT23,MAT33,  
MAT43,MAT53,MAT63,MAT14,MAT24,MAT34,MAT44,MAT54,  
MAT64,MB52,MB72,MB53,MB73,MB54,MB74,MB1,MB2,MB3,  
MB4,MB5,MB6,MBT12,MBT22,MBT32,MBT42,MBT52,MBT62,  
MBT13,MBT23,MBT33,MBT43,MBT53,MBT63,MBT14,MBT24,  
MBT34,MBT44,MBT54,MBT64,A1,A2,A3,A4,A5,A6,FA5,FA7,B1  
B2,B3,B4,B5,B6,FB5,FB7:REAL;
```

```
Const
```

```
W = 314.16;  
K2= 128.87;  
K3= 82.985;  
K4 = 73;  
P=2;  
Kr5=1.748;  
Kr7=2.145;  
Kx5=0.792;  
Kx7=0.689;  
Ra1=1.97;  
Ra2=2.656;{A MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR DIRENCI}  
Xa1=1.867;  
Xa2=1.867;{A MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR REAKTANSI}  
Rb1=1.89;  
Rb2=1.77; {B MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR DIRENCI}  
Xb1=2.05;  
Xb2=2.05; {B MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR REAKTANSI}
```

```
Begin
```

```
ASSIGN(MTA2,'MTOFA2.DAT');  
REWRITE(MTA2);  
ASSIGN(MTA3,'MTOFA3.DAT');  
REWRITE(MTA3);  
ASSIGN(MTA4,'MTOFA4.DAT');  
REWRITE(MTA4);
```



```
ASSIGN(MTB2, 'MTOFB2.DAT');
REWRITE(MTB2);
ASSIGN(MTB3, 'MTOFB3.DAT');
REWRITE(MTB3);
ASSIGN(MTB4, 'MTOFB4.DAT');
REWRITE(MTB4);
ASSIGN(MA234, 'MA234.DAT');
REWRITE(MA234);
ASSIGN(MB234, 'MB234.DAT');
REWRITE(MB234);
```

Clrscr;

```
I:=10;
if I=10 then V12:=0;
if I=10 then V52:=0;
if I=10 then V72:=0;
if I=10 then V13:=0;
if I=10 then V53:=0;
if I=10 then V73:=0;
if I=10 then V14:=0;
if I=10 then V54:=0;
if I=10 then V74:=0;
```

REPEAT

```
X11:=I* 0.017453;
X22:=(X11/2) + 0.7854;
X23:=((2*X11)/3)+0.5236;
X33:=(X11/3)+1.0472;
X24:=((3*X11)/4) + 0.3927;
X34:=(X11/2) + 0.7854;
X44:=(X11/4) + 1.1781;
V12:=(1/1)*(COS(X11)+cos(X22));
V52:=(1/5)*(COS(5*X11)+cos(5*X22));
V72:=(1/7)*(COS(7*X11)+cos(7*X22));
V13:=(1/1)*(COS(X11)+COS(X23)+COS(X33));
V53:=(1/5)*(COS(5*X11)+COS(5*X23)+COS(5*X33));
V73:=(1/7)*(COS(7*X11)+COS(7*X23)+COS(7*X33));
V14:=(1/1)*(COS(X11)+COS(X24)+COS(X34)+COS(X44));
V54:=(1/5)*(COS(5*X11)+COS(5*X24)+COS(5*X34)+COS(5*X44));
V74:=(1/7)*(COS(7*X11)+COS(7*X24)+COS(7*X34)+COS(7*X44));
L2:=(220/V12);
L3:=(220/V13);
L4:=(220/V14);
V12:=K2*L2*V12;
V52:=K2*L2*V52;
V72:=K2*L2*V72;
V13:=K3*L3*V13;
V53:=K3*L3*V53;
V73:=K3*L3*V73;
V14:=K4*L4*V14;
V54:=K4*L4*V54;
V74:=K4*L4*V74;
FA5:=(1570.8*(SQR(Ra1+Ra2*Kr5)+SQR((Xa1+(Kx5*Xa2))*5)));
FA7:=(2199.11*(SQR(Ra1+Ra2*Kr7)+SQR((Xa1+(Kx7*Xa2))*7)));
MA52:=(3*P*SQR(V52)*Kr5*Ra2)/FA5;
MA72:=(3*P*SQR(V72)*Kr7*Ra2)/FA7;
MA53:=(3*P*SQR(V53)*Kr5*Ra2)/FA5;
```

MA73:=(3*P*SQR(V73)*Kr7*Ra2)/FA7;
MA54:=(3*P*SQR(V54)*Kr5*Ra2)/FA5;
MA74:=(3*P*SQR(V74)*Kr7*Ra2)/FA7;

A1:=(314.16*(SQR(Ra1+(Ra2/0.05))+SQR(Xa1+Xa2)));
MA1:=(290400*(Ra2/0.05))/A1;
A2:=(314.16*(SQR(Ra1+(Ra2/0.1))+SQR(Xa1+Xa2)));
MA2:=(290400*(Ra2/0.1))/A2;
A3:=(314.16*(SQR(Ra1+(Ra2/0.2))+SQR(Xa1+Xa2)));
MA3:=(290400*(Ra2/0.2))/A3;
A4:=(314.16*(SQR(Ra1+(Ra2/0.3))+SQR(Xa1+Xa2)));
MA4:=(290400*(Ra2/0.3))/A4;
A5:=(314.16*(SQR(Ra1+(Ra2/0.4))+SQR(Xa1+Xa2)));
MA5:=(290400*(Ra2/0.4))/A5;
A6:=(314.16*(SQR(Ra1+(Ra2/0.5))+SQR(Xa1+Xa2)));
MA6:=(290400*(Ra2/0.5))/A6;

MAT12:=MA1-MA52+MA72;
MAT22:=MA2-MA52+MA72;
MAT32:=MA3-MA52+MA72;
MAT42:=MA4-MA52+MA72;
MAT52:=MA5-MA52+MA72;
MAT62:=MA6-MA52+MA72;

MAT13:=MA1-MA53+MA73;
MAT23:=MA2-MA53+MA73;
MAT33:=MA3-MA53+MA73;
MAT43:=MA4-MA53+MA73;
MAT53:=MA5-MA53+MA73;
MAT63:=MA6-MA53+MA73;

MAT14:=MA1-MA54+MA74;
MAT24:=MA2-MA54+MA74;
MAT34:=MA3-MA54+MA74;
MAT44:=MA4-MA54+MA74;
MAT54:=MA5-MA54+MA74;
MAT64:=MA6-MA54+MA74;

FB5:=(1570.8*(SQR(Rb1+Rb2*Kr5)+SQR((Xb1+(Kx5*Xb2))*5)));
FB7:=(2199.11*(SQR(Rb1+Rb2*Kr7)+SQR((Xb1+(Kx7*Xb2))*7)));
MB52:=(3*P*SQR(V52)*Kr5*Rb2)/FB5;
MB72:=(3*P*SQR(V72)*Kr7*Rb2)/FB7;
MB53:=(3*P*SQR(V53)*Kr5*Rb2)/FB5;
MB73:=(3*P*SQR(V73)*Kr7*Rb2)/FB7;
MB54:=(3*P*SQR(V54)*Kr5*Rb2)/FB5;
MB74:=(3*P*SQR(V74)*Kr7*Rb2)/FB7;

B1:=(314.16*(SQR(Rb1+(Rb2/0.05))+SQR(Xb1+Xb2)));
MB1:=(290400*(Rb2/0.05))/B1;
B2:=(314.16*(SQR(Rb1+(Rb2/0.1))+SQR(Xb1+Xb2)));
MB2:=(290400*(Rb2/0.1))/B2;
B3:=(314.16*(SQR(Rb1+(Rb2/0.2))+SQR(Xb1+Xb2)));
MB3:=(290400*(Rb2/0.2))/B3;
B4:=(314.16*(SQR(Rb1+(Rb2/0.3))+SQR(Xb1+Xb2)));
MB4:=(290400*(Rb2/0.3))/B4;
B5:=(314.16*(SQR(Rb1+(Rb2/0.4))+SQR(Xb1+Xb2)));
MB5:=(290400*(Rb2/0.4))/B5;

```
B6:=(314.16*(SQR(Rb1+(Rb2/0.5))+SQR(Xb1+Xb2)));
MB6:=(290400*(Rb2/0.5))/B6;
```

```
MBT12:=MB1-MB52+MB72;
MBT22:=MB2-MB52+MB72;
MBT32:=MB3-MB52+MB72;
MBT42:=MB4-MB52+MB72;
MBT52:=MB5-MB52+MB72;
MBT62:=MB6-MB52+MB72;
```

```
MBT13:=MB1-MB53+MB73;
MBT23:=MB2-MB53+MB73;
MBT33:=MB3-MB53+MB73;
MBT43:=MB4-MB53+MB73;
MBT53:=MB5-MB53+MB73;
MBT63:=MB6-MB53+MB73;
```

```
MBT14:=MB1-MB54+MB74;
MBT24:=MB2-MB54+MB74;
MBT34:=MB3-MB54+MB74;
MBT44:=MB4-MB54+MB74;
MBT54:=MB5-MB54+MB74;
MBT64:=MB6-MB54+MB74;
```

```
writeln(MTA2,I,MAT12,MAT22,MAT32,MAT42,MAT52,MAT62);
writeln(MTA3,I,MAT13,MAT23,MAT33,MAT43,MAT53,MAT63);
writeln(MTA4,I,MAT14,MAT24,MAT34,MAT44,MAT54,MAT64);
writeln(MTB2,I,MBT12,MBT22,MBT32,MBT42,MBT52,MBT62);
writeln(MTB3,I,MBT13,MBT23,MBT33,MBT43,MBT53,MBT63);
writeln(MTB4,I,MBT14,MBT24,MBT34,MBT44,MBT54,MBT64);
writeln(MA234,I,MA52,MA72,MA53,MA73,MA54,MA74);
writeln(MB234,I,MB52,MB72,MB53,MB73,MB54,MB74);
```

```
inc(I,1);
F:= 77-I;
UNTIL F=0;
```

```
close(MTA2);
close(MTA3);
close(MTA4);
close(MTB2);
close(MTB3);
close(MTB4);
close(MA234);
close(MB234);
readln;
end.
```

```
{ 2,3 ve 4 BASAMAKLI KARE DALGA GERILIMLERININ URETTIGI}  
{ 5 ve 7'inci AKIM HARMONIKLERININ DEGISIK KAYMA }  
{ DEGERLERINDE TEMEL AKIM UZERINDEKI ETKISININ ANALIZI}
```

```
PROGRAM DCMOTOR_SIM;
```

```
Uses      crt;
```

```
Var
```

```
ITA2:TEXT;  
ITA3:TEXT;  
ITA4:TEXT;  
ITB2:TEXT;  
ITB3:TEXT;  
ITB4:TEXT;  
IA234:TEXT;  
IB234:TEXT;
```

```
I,F:integer;
```

```
X44,X34,X24,X33,X23,X22,X11,V12,V52,V72,V13,V53,V73,  
V14,V54,V74, V2max, V3max,V4max, L2,L3,L4,IA52,IA72,  
IA53,IA73,IA54, IA74, IA1,IA2,IA3,IA4,IA5,IA6,ITA12,  
ITA22, ITA32, ITA42,ITA52, ITA62, ITA13,ITA23,ITA33,  
ITA43, ITA53, ITA63, ITA14, ITA24,ITA34,ITA44,ITA54,  
ITA64,IB52,IB72,IB53,IB73,IB54,IB74,IB1,IB2,IB3,IB4,  
IB5, IB6, ITB12,ITB22,ITB32,ITB42,ITB52,ITB62,ITB13,  
ITB23, ITB33, ITB43, ITB53,ITB63,ITB14,ITB24, ITB34,  
ITB44,ITB54,ITB64:REAL;
```

```
Const
```

```
W = 314.16;  
K2=128.87;  
K3= 92.985;  
K4 = 73;  
P=2;  
Kr5=1.748;  
Kr7=2.145;  
Kx5=0.792;  
Kx7=0.689;  
Ra1=1.97;  
Ra2=2.656;{A MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR DIRENCI}  
Xa1=1.867;  
Xa2=1.867;{A MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR REAKTANSI}  
Rb1=1.89;  
Rb2=1.77; {B MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR DIRENCI}  
Xb1=2.05;  
Xb2=2.05; {B MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR REAKTANSI}
```

```
Begin
```

```
ASSIGN(ITA2,'ITA2.DAT');  
REWRITE(ITA2);  
ASSIGN(ITA3,'ITA3.DAT');  
REWRITE(ITA3);  
ASSIGN(ITA4,'ITA4.DAT');  
REWRITE(ITA4);  
ASSIGN(IA234,'IA234.DAT');  
REWRITE(IA234);
```

```
ASSIGN(ITB2, 'ITB2.DAT');  
REWRITE(ITB2);  
ASSIGN(ITB3, 'ITB3.DAT');  
REWRITE(ITB3);  
ASSIGN(ITB4, 'ITB4.DAT');  
REWRITE(ITB4);  
ASSIGN(IB234, 'IB234.DAT');  
REWRITE(IB234);
```

Clrscr;

```
I:=5;  
if I=5 then V12:=0;  
if I=5 then V52:=0;  
if I=5 then V72:=0;  
if I=5 then V13:=0;  
if I=5 then V53:=0;  
if I=5 then V73:=0;  
if I=5 then V14:=0;  
if I=5 then V54:=0;  
if I=5 then V74:=0;
```

REPEAT

```
X11:=I* 0.017453;  
X22:=(X11/2) + 0.7854;  
X23:=((2*X11)/3)+0.5236;  
X33:=(X11/3)+1.0472;  
X24:=((3*X11)/4) + 0.3927;  
X34:=(X11/2) + 0.7854;  
X44:=(X11/4) + 1.1781;  
V12:=(1/1)*(cos(X11)+cos(X22));  
V52:=(1/5)*(cos(5*X11)+cos(5*X22));  
V72:=(1/7)*(cos(7*X11)+cos(7*X22));  
V13:=(1/1)*(cos(X11)+cos(X23)+cos(X33));  
V53:=(1/5)*(cos(5*X11)+cos(5*X23)+cos(5*X33));  
V73:=(1/7)*(cos(7*X11)+cos(7*X23)+cos(7*X33));  
V14:=(1/1)*(cos(X11)+cos(X24)+cos(X34)+cos(X44));  
V54:=(1/5)*(cos(5*X11)+cos(5*X24)+cos(5*X34)+cos(5*X44));  
V74:=(1/7)*(cos(7*X11)+cos(7*X24)+cos(7*X34)+cos(7*X44));  
L2:=(220/V12);  
L3:=(220/V13);  
L4:=(220/V14);  
V12:=k2*L2*V12;  
V52:=k2*L2*V52;  
V72:=k2*L2*V72;  
V13:=k3*L3*V13;  
V53:=k3*L3*V53;  
V73:=k3*L3*V73;  
V14:=k4*L4*V14;  
V54:=k4*L4*V54;  
V74:=k4*L4*V74;  
V2max:=L2*143.14;  
V3max:=L3*103.28;  
V4max:=L4*81.0834;  
IA52:=(V52)/(SQRT(SQR(Ra1+Ra2*Kr5)+SQR((Xa1+(Kx5*Xa2))*5)));  
IA72:=(V72)/(SQRT(SQR(Ra1+Ra2*Kr7)+SQR((Xa1+(Kx7*Xa2))*7)));  
IA53:=(V53)/(SQRT(SQR(Ra1+Ra2*Kr5)+SQR((Xa1+(Kx5*Xa2))*5)));  
IA73:=(V73)/(SQRT(SQR(Ra1+Ra2*Kr7)+SQR((Xa1+(Kx7*Xa2))*7)));  
IA54:=(V54)/(SQRT(SQR(Ra1+Ra2*Kr5)+SQR((Xa1+(Kx5*Xa2))*5)));
```


IA74:=(V74)/(SQRT(SQR(Ra1+Ra2*Kr7)+SQR((Xa1+(Kx7*Xa2))*7)));

IA1:=(220)/(SQRT(SQR(1.97+34.46)+SQR(1.867+20.98)));

IA2:=(220)/(SQRT(SQR(1.97+22.21)+SQR(1.867+8.415)));

IA3:=(220)/(SQRT(SQR(1.97+12.24)+SQR(1.867+3.71)));

IA4:=(220)/(SQRT(SQR(1.97+8.365)+SQR(1.867+2.70)));

IA5:=(220)/(SQRT(SQR(1.97+6.342)+SQR(1.867+2.34)));

IA6:=(220)/(SQRT(SQR(1.97+5.102)+SQR(1.867+2.16)));

ITA12:=sqrt(sqr(IA1)+sqr(IA52)+sqr(IA72));

ITA22:=sqrt(sqr(IA2)+sqr(IA52)+sqr(IA72));

ITA32:=sqrt(sqr(IA3)+sqr(IA52)+sqr(IA72));

ITA42:=sqrt(sqr(IA4)+sqr(IA52)+sqr(IA72));

ITA52:=sqrt(sqr(IA5)+sqr(IA52)+sqr(IA72));

ITA62:=sqrt(sqr(IA6)+sqr(IA52)+sqr(IA72));

ITA13:=sqrt(sqr(IA1)+sqr(IA53)+sqr(IA73));

ITA23:=sqrt(sqr(IA2)+sqr(IA53)+sqr(IA73));

ITA33:=sqrt(sqr(IA3)+sqr(IA53)+sqr(IA73));

ITA43:=sqrt(sqr(IA4)+sqr(IA53)+sqr(IA73));

ITA53:=sqrt(sqr(IA5)+sqr(IA53)+sqr(IA73));

ITA63:=sqrt(sqr(IA6)+sqr(IA53)+sqr(IA73));

ITA14:=sqrt(sqr(IA1)+sqr(IA54)+sqr(IA74));

ITA24:=sqrt(sqr(IA2)+sqr(IA54)+sqr(IA74));

ITA34:=sqrt(sqr(IA3)+sqr(IA54)+sqr(IA74));

ITA44:=sqrt(sqr(IA4)+sqr(IA54)+sqr(IA74));

ITA54:=sqrt(sqr(IA5)+sqr(IA54)+sqr(IA74));

ITA64:=sqrt(sqr(IA6)+sqr(IA54)+sqr(IA74));

IB52:=(V52)/(SQRT(SQR(Rb1+Rb2*Kr5)+SQR((Xb1+(Kx5*Xb2))*5)));

IB72:=(V72)/(SQRT(SQR(Rb1+Rb2*Kr7)+SQR((Xb1+(Kx7*Xb2))*7)));

IB53:=(V53)/(SQRT(SQR(Rb1+Rb2*Kr5)+SQR((Xb1+(Kx5*Xb2))*5)));

IB73:=(V73)/(SQRT(SQR(Rb1+Rb2*Kr7)+SQR((Xb1+(Kx7*Xb2))*7)));

IB54:=(V54)/(SQRT(SQR(Rb1+Rb2*Kr5)+SQR((Xb1+(Kx5*Xb2))*5)));

IB74:=(V74)/(SQRT(SQR(Rb1+Rb2*Kr7)+SQR((Xb1+(Kx7*Xb2))*7)));

IB1:=(220)/(SQRT(SQR(1.89+23.8)+SQR(2.05+10)));

IB2:=(220)/(SQRT(SQR(1.89+14.43)+SQR(2.05+4.48)));

IB3:=(220)/(SQRT(SQR(1.89+7.87)+SQR(2.05+2.58)));

IB4:=(220)/(SQRT(SQR(1.89+5.39)+SQR(2.05+2.2)));

IB5:=(220)/(SQRT(SQR(1.89+4.09)+SQR(2.05+2.08)));

IB6:=(220)/(SQRT(SQR(1.89+3.3)+SQR(2.05+2.025)));

ITB12:=sqrt(sqr(IB1)+sqr(IB52)+sqr(IB72));

ITB22:=sqrt(sqr(IB2)+sqr(IB52)+sqr(IB72));

ITB32:=sqrt(sqr(IB3)+sqr(IB52)+sqr(IB72));

ITB42:=sqrt(sqr(IB4)+sqr(IB52)+sqr(IB72));

ITB52:=sqrt(sqr(IB5)+sqr(IB52)+sqr(IB72));

ITB62:=sqrt(sqr(IB6)+sqr(IB52)+sqr(IB72));

ITB13:=sqrt(sqr(IB1)+sqr(IB53)+sqr(IB73));

ITB23:=sqrt(sqr(IB2)+sqr(IB53)+sqr(IB73));

ITB33:=sqrt(sqr(IB3)+sqr(IB53)+sqr(IB73));

ITB43:=sqrt(sqr(IB4)+sqr(IB53)+sqr(IB73));

ITB53:=sqrt(sqr(IB5)+sqr(IB53)+sqr(IB73));

ITB63:=sqrt(sqr(IB6)+sqr(IB53)+sqr(IB73));

```
ITB14:=sqrt(sqr(IB1)+sqr(IB54)+sqr(IB74));
ITB24:=sqrt(sqr(IB2)+sqr(IB54)+sqr(IB74));
ITB34:=sqrt(sqr(IB3)+sqr(IB54)+sqr(IB74));
ITB44:=sqrt(sqr(IB4)+sqr(IB54)+sqr(IB74));
ITB54:=sqrt(sqr(IB5)+sqr(IB54)+sqr(IB74));
ITB64:=sqrt(sqr(IB6)+sqr(IB54)+sqr(IB74));

writeln(ITA2,I,ITA12,ITA22,ITA32,ITA42,ITA52,ITA62);
writeln(ITA3,I,ITA13,ITA23,ITA33,ITA43,ITA53,ITA63);
writeln(ITA4,I,ITA14,ITA24,ITA34,ITA44,ITA54,ITA64);
writeln(IA234,I,IA52,IA72,IA53,IA73,IA54,IA74);
writeln(ITB2,I,ITB12,ITB22,ITB32,ITB42,ITB52,ITB62);
writeln(ITB3,I,ITB13,ITB23,ITB33,ITB43,ITB53,ITB63);
writeln(ITB4,I,ITB14,ITB24,ITB34,ITB44,ITB54,ITB64);
writeln(IB234,I,IB52,IB72,IB53,IB73,IB54,IB74);
  inc(I,1);
  F:= 75-I;
  UNTIL F=0;
close(ITA2);
close(ITA3);
close(ITA4);
close(IA234);
close(ITB2);
close(ITB3);
close(ITB4);
close(IB234);
readln;
end.
```

```
{B MAKINASININ MOMENTI A MAKINASININ MOMENTINE ESIT-}  
{ LENMESI ICIN B MAKINASININ STATORONA VE ROTORUNA }  
{ BAGLANMASI GEREKEN DIRENCLERIN VE REAKTANSLARIN }  
{ DEGERLERI }
```

PROGRAM DCMOTOR_SIM;

Uses crt;

Var

R12X12B:TEXT;

KFRXB:TEXT;

VERGRXB:TEXT;

IGRXB:TEXT;

I:integer;

DR1, KFR1,BR1,CR1,MA,MB,S,R11,R21,R111,P1R1,VERR1,
IGR1,IGR2,IGX1,IGX2,DR2,KFR2,BR2,CR2,R12,R22,R121,
P1R2, VERR2, VERGR1,VERGR2,VERGX1,VERGX2,DX1,KFX1,
BX1,CX1,X11,X21,X111,P1X1,VERX1,PGR1,PGR2,PGX1,C2,
PGX2,DX2, KFX2,BX2,CX2,X12,X22,X121,P1X2,VERX2,C1,
A1, A2, A3, A4,B1,B2,B3,B4,CR,JR11,JR12,FR11,FR12,
FR21,FR22,JR21,JR22,FX11,JX11,FX21,FX22,JX21,JX22:REAL;

Const

Ra1=1.97;

Ra2=2.656;{A MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR DIRENCI}

Xa1=1.867;

Xa2=1.867;{A MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR REAKTANSI}

Rb1=1.89;

Rb2=1.77;{B MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR DIRENCI}

Xb1=2.05;

Xb2=2.05;{B MOTORUN STATORA INDIRGENMIS ROTOR REAKTANSI}

Begin

ASSIGN(R12X12B,'R12X12B.DAT');

REWRITE(R12X12B);

ASSIGN(KFRXB,'KFRXB.DAT');

REWRITE(KFRXB);

ASSIGN(VERGRXB,'VERGRXB.DAT');

REWRITE(VERGRXB);

ASSIGN(IGRXB,'IGRXB.DAT');

REWRITE(IGRXB);

Clrscr;

I:=56;

S:=0;

MA:=0;

MB:=0;

REPEAT

S:=1-0.01*I;

BR1:=2*(Rb2/s);

CR:=(SQR(S)-((924.4*Rb2)/(MA*S)));

CR1:=(Xb1*Xb1+Xb2*Xb2+2*Xb1*Xb2+(SQR(Rb2))/CR);

DR1:=SQR(BR1)-4*CR1;

R11:=(-BR1+SQRT(DR1))/2;

R21:=(-BR1-SQRT(DR1))/2;


```
R111:=R11-1.89;
FR11:=(130*SQR(S)+7710*S+97);
FR12:=(4361*SQR(S)+109.7*S+3.31);
A1:=R11+(FR11/FR12);
JR11:=(8695*SQR(S)+176.3);
JR21:=(4361*SQR(S)+109.7*S+3.31);
B1:=2.05+(JR11/JR21);
KFR1:=A1/(SQR(SQR(A1)+SQR(B1)));
IGR1:=220/(SQR(SQR(A1)+SQR(B1)));
PGR1:=1.732*380*IGR1*KFR1;
VERGR1:=((157*(1-S)*MA)/PGR1)*100;

BR2:=(2*Rb1-(924.4/MA))*S;
CR2:=(Xb1*Xb1+Xb2*Xb2+2*Xb1*Xb2+Rb1*Rb1)*SQR(S);
DR2:=SQR(BR2)-4*CR2;
R12:=(-BR2+SQR(DR2))/2;
R22:=(-BR2-SQR(DR2))/2;
R121:=R12-1.77;
FR21:=(130*SQR(S)+4356*S*R12+31*SQR(R12));
FR22:=(4361*SQR(S)+62*S*R12+SQR(R12));
A2:=1.89+(FR21/FR22);
JR21:=(8695*SQR(S)+56.26*SQR(R12));
JR22:=(4361*SQR(S)+62*S*R12+SQR(R12));
B2:=2.05+(JR21/JR22);
KFR2:=A2/(SQR(SQR(A2)+SQR(B2)));
IGR2:=220/(SQR(SQR(A2)+SQR(B2)));
PGR2:=1.732*380*IGR2*KFR2;
VERGR2:=((157*(1-S)*MA)/PGR2)*100;

BX1:=2*Xb2;
C1:=(Xb2*Xb2)+(Rb1*Rb1)+((2*Rb1*Rb2)/S);
CX1:=(C1+(SQR(Rb2)/SQR(S))-((924.4*Rb2)/(MA*S)));
DX1:=SQR(BX1)-4*CX1;
X11:=(-BX1+SQR(DX1))/2;
X21:=(-BX1-SQR(DX1))/2;
X111:=X11-2.05;
FX11:=(130*SQR(S)+7710*S+97);
A3:=1.89+(FX11/(4361*SQR(S)+109.7*S+3.31));
JX11:=(8695*SQR(S)+176.3);
B3:=X11+(JX11/(4361*SQR(S)+109.7*S+3.31));
KFX1:=A3/(SQR(SQR(A3)+SQR(B3)));
IGX1:=220/(SQR(SQR(A3)+SQR(B3)));
PGX1:=1.732*380*IGR1*KFX1;
PIX1:=1.732*380*7.75*KFX1;
VERX1:=(3000/PIX1)*100;
VERGX1:=((157*(1-S)*MA)/PGX1)*100;
BX2:=2*Xb1;
C2:=(Xb1*Xb1)+(Rb1*Rb1)+((2*Rb1*Rb2)/S)+(SQR(Rb2));
CX2:=(C2/SQR(S))-((924.4*Rb2)/(MA*S));
DX2:=SQR(BX1)-4*CX1;
X12:=(-BX2+SQR(DX2))/2;
X22:=(-BX2-SQR(DX2))/2;
X121:=X12-2.05;
FX21:=(31*SQR(S*X12)+199*S*X12+97+7309*S);
FX22:=(SQR(S*X12)+112.52*S*S*X12+3.31+109.7*S+4126*SQR(S));
A4:=1.89+(FX21/FX22);
JX21:=(56.26*SQR(S*X12)+4126*S*S*X12+176.3);
```

```
JX22:=(SQR(S*X12)+112.52*S*S*X12+3.31+109.7*S+4126*SQR(S));
B4:=2.05+(JX21/JX22);
KFX2:=A4/(SQR(SQR(A4)+SQR(B4)));
IGX2:=220/(SQR(SQR(A4)+SQR(B4)));
PGX2:=1.732*380*IGX2*KFX2;
VERGX2:=((157*(1-S)*MA)/PGX2)*100;

writeln(R12X12b,S:5,R111,R121,X111,X121);
writeln(KFRXB,S:5,KFR1,KFR2,KFX1,KFX2);
writeln(VERGRXB,S:5,VERGR1,VERGR2,VERGX1,VERGX2);
writeln(IGRXB,S:5,IGR1,IGR2,IGX1,IGX2);
    inc(I,1);
    UNTIL I=96;
close(R12X12B);
close(KFRXB);
close(VERGRXB);
close(IGRXB);
readln;
end.
```

ÖZGEÇMİŞ

Majid Mohaddes 28.9.1960 da İran'ın Meşhed kentinde dünyaya geldi. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Meşhed'de tamamladı. 1985 yılında Türkiye'ye gelerek YÖS sınavına katıldı ve İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünü kazandı. Bir yıl İstanbul Üniversitesi Yabancı Diller Bölümünde Türkçe eğitiminden sonra 1986 yılında mesleki derslere başladı ve 1990 yılında aynı bölümden mezun oldu.

