

# ANALISIS SLIP OPTIMAL MOTOR INDUKSI TIGA FASA UNTUK EFISIENSI OPTIMAL PADA BEBAN RENDAH

**Jones Haposan Manurung, Eddy Warman**  
Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)  
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA  
e-mail: jhomanroe@yahoo.co.id

## Abstrak

Motor induksi tiga fasa tidak selalu bekerja pada beban penuh. Dalam banyak penerapan, motor akan bekerja pada beban dengan kecepatan kurang dari kecepatan nominal. Dalam kondisi ini keseimbangan rugi-rugi akan terganggu yang mengakibatkan efisiensi motor akan rendah. Dalam pembahasan ini efisiensi motor induksi akan dioptimalkan pada beban-beban ringan dengan menggunakan slip sebagai peubah bebas. Pada umumnya, torsi beban dianggap sebagai peubah bebas dengan slip, faktor daya, daya masuk, dan efisiensi, dianggap sebagai peubah tidak bebas. Dari model rangkaian ekivalen akan dapat diperlihatkan bahwa diantara besaran-besaran slip, faktor daya, daya masuk, dan efisiensi, besaran yang merupakan peubah adalah slip. Oleh sebab itu, impedansi masukan, faktor daya, daya masukan, dan efisiensi dapat dianggap sebagai fungsi slip. Ini berarti jika suatu slip optimal dapat ditentukan, maka efisiensi optimal motor akan diperoleh pada slip optimal. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa efisiensi akan diperbaiki pada beban-beban ringan, yaitu : 81,27% untuk motor 3 HP, 81,07% untuk motor 5 HP, dan 81,1% untuk motor 7,3 HP. Dari kurva standar efisiensi motor memperlihatkan bahwa efisiensi motor pada beban-beban ringan berkisar 40% sampai 50%. Dengan mengoptimalkan slip, efisiensi naik berkisar 81%. Ada penghematan energi yang akan diperoleh dengan mengoptimalkan slip.

**Kata Kunci:** Slip, efisiensi

## 1. Pendahuluan

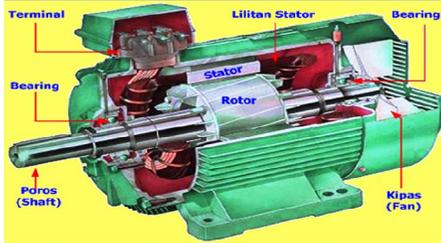
Motor-motor listrik mengkonsumsi sekitar 55% dari total konsumsi energi listrik [1]. Sekitar 67% dari konsumsi energi listrik motor digunakan dalam motor induksi dengan kapasitas di bawah 55 kW. Oleh karena itu 85% rugi-rugi energi didisipasikan dalam motor dengan kapasitas di bawah 55 kW [1]. Dalam penerapannya sangatlah sulit merancang dan membuat motor. Dalam penerapannya sangatlah sulit merancang dan membuat motor dengan efisiensi tinggi dalam seluruh jangkauan (range) pembebanan. Terutama dalam pembebanan 0% sampai 15% dari beban nominal yang biasa disebut beban ringan (rendah) atau beban sebagian (light load/partial load). Motor-motor listrik pada umumnya dan motor induksi pada khususnya beroperasi sangat efisien di sekitar titik operasi nominalnya. Pada titik ini, keseimbangan antara rugi-rugi beban dan rugi magnetisasi dirancang optimum. Pada beban-beban ringan, rugi konstan akan lebih dominan dibanding rugi-rugi lain yang mengakibatkan pengurangan efisiensi proses konversi energi.

Karena itu penghematan energi sangatlah penting mengingat penggunaan energi listrik berkaitan erat dengan penggunaan bahan bakar minyak yang saat ini harganya melonjak naik, dan juga mengurangi biaya operasi dan biaya kapital dari penggunaan sistem. Hal inilah yang menjadi latar belakang penulisan ini, mengukur potensi penghematan yang dapat direalisasikan pada beban ringan (rendah). Tujuan dari penulisan ini adalah memperlihatkan potensi penghematan energi motor induksi tiga fasa pada beban-beban ringan.

## 2. Motor Induksi Tiga Fasa

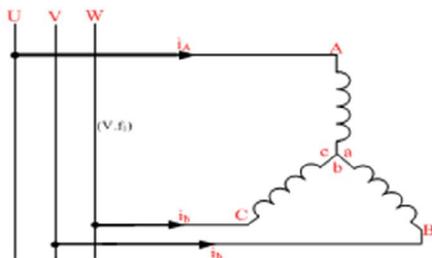
Motor listrik diklasifikasikan sebagai motor listrik arus searah dan motor listrik arus bolak-balik. Motor listrik bolak-balik diklasifikasikan lagi menjadi motor listrik sinkron dan motor listrik asinkron (induksi). Hampir 90% motor yang digunakan di industri adalah motor induksi, khususnya motor induksi tiga fasa. Konversi energi listrik menjadi mekanik terjadi dalam bagian berputar motor. Dalam motor arus

searah, daya listrik dikonduksikan langsung ke jangkar (bagian yang berputar) melalui sikat-sikat dan komutator. Rotor tidak menerima daya listrik langsung tetapi dengan proses induksi. Oleh sebab itu disebut motor induksi [2].



Gambar 1. Bagian Motor induksi Tiga Fasa [2]

Konversi energi terjadi melalui proses induksi dari medan putar yang timbul pada belitan stator memotong konduktor-konduktor rotor. Medan putar stator terjadi jika catu daya tiga fasa diberikan ke belitan stator 3 fasa simetris yang terpisah  $120^\circ$  satu sama lain. Arus yang mengalir pada masing-masing belitan akan menghasilkan fluks magnet pada masing-masingnya. Fluks magnet akan sinusoidal mengikuti bentuk gelombang arusnya. Fluks magnet ketiga fasa diperlihatkan dalam gambar berikut.



Gambar 2. Konsep Medan Putar [2]

Medan putar akan berputar pada kecepatan konstan yang disebut kecepatan sinkron yang besarnya dinyatakan dengan [3]:

$$N_s = \frac{60f_1}{P/2} \text{ rpm} \quad (1)$$

Dimana  $f_1$  adalah frekuensi tegangan masuk ke stator dan  $P$  adalah jumlah kutub stator.

## 2.1. Prinsip Kerja motor Induksi Tiga Fasa

Pada saat terminal tiga fasa stator motor induksi diberi suplai tegangan tiga fasa seimbang, maka akan mengalir arus pada konduktor di tiap belitan fasa stator dan akan menghasilkan fluksi bolak-balik. Amplitudo fluksi per fasa yang dihasilkan berubah secara sinusoidal dan menghasilkan fluks resultan (medan putar) dengan magnitud yang nilainya konstan yang berputar dengan kecepatan sinkron. Medan putar akan terinduksi melalui celah udara menghasilkan ggl induksi (ggl lawan) pada belitan fasa stator. Medan putar tersebut juga akan memotong konduktor-konduktor belitan rotor yang diam. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan relatif antara kecepatan fluksi yang berputar dengan konduktor rotor yang diam, yang disebut juga dengan slip ( $s$ ). Karena belitan rotor merupakan rangkaian tertutup, baik melalui cincin ujung (*end ring*) ataupun tahanan luar, maka arus akan mengalir pada konduktor-konduktor rotor. Karena konduktor-konduktor rotor yang mengalirkan arus ditempatkan di dalam daerah medan magnet yang dihasilkan stator, maka akan terbentuk gaya mekanik (gaya lorentz) pada konduktor-konduktor rotor. Hal ini sesuai dengan hukum gaya lorentz yaitu bila suatu konduktor yang dialiri arus berada dalam suatu kawasan medan magnet, maka konduktor tersebut akan mendapat gaya elektromagnetik.

Prinsip kerja motor induksi tiga fasa dapat diurutkan sebagai berikut [3]:

1. Apabila sumber tegangan 3 fase dipasang pada kumparan stator, akan timbul medan putar dengan kecepatan  $n_s = 120 f/P$
2. Medan stator tersebut akan memotong batang konduktor pada motor
3. Akibatnya pada batang konduktor dari rotor akan timbul GGL induksi
4. Karena batang konduktor merupakan rangkaian yang tertutup maka GGL akan menghasilkan arus ( $I$ )
5. Adanya arus ( $I$ ) didalam medan magnet akan menimbulkan gaya ( $F$ ) pada rotor
6. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya ( $F$ ) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel pada beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator
7. GGL induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan stator. GGL induksi timbul, karena adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan

putar stator ( $n_s$ ) dengan kecepatan medan putar rotor ( $n_r$ ).

**2.2. Slip dan Efisiensi**

Perbedaan antara kecepatan rotor dan medan putar stator disebut slip rotor. Semakin besar beban motor, semakin besar nilai slip rotor [3].

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \tag{2}$$

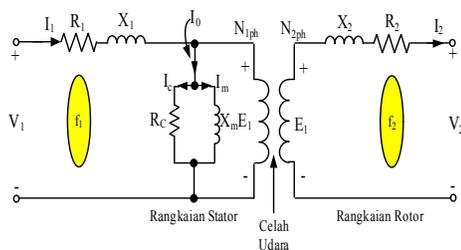
Efisiensi motor adalah perbandingan antara daya keluaran yang berguna dengan daya masukan total, yaitu [4]:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \tag{3}$$

Oleh karena itu, terdapat hubungan antara besarnya slip dan efisiensi motor. Semakin besar slip, semakin rendah efisiensi motor.

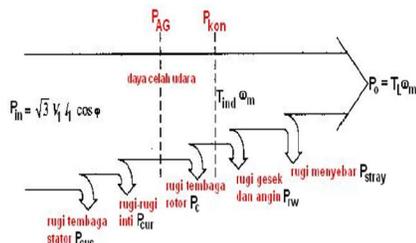
**2.3. Rangkaian Ekuivalen**

Rangkaian ekuivalen selalu berdasarkan belitan stator hubungan bintang (Y) tanpa memandang hubungan belitan sebenarnya. Dan tidak pernah menggunakan rangkaian ekuivalen tiga fasa. Selalu menggunakan rangkaian ekuivalen/fasa.



Gambar 3. Rangkaian ekuivalen/Fasa Kondisi Rotor Terbuka [2]

Frekuensi tegangan  $E_1(f_1)$  akan sama dengan frekuensi tegangan  $E_2 (f_2)$ .



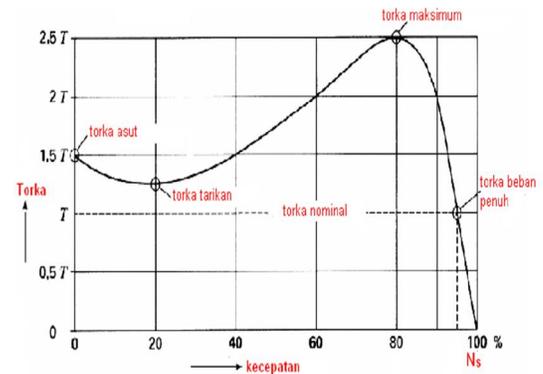
Gambar 4. Diagram Aliran Daya Motor induksi [5]

Karakteristik torka-putaran memperlihatkan hubungan torka yang dibangkitkan dengan putaran motor. Torka terbangkit motor dinyatakan dengan persamaan rumus [5]:

$$T_{ind} = \frac{P_{kon}}{\omega_m} = \frac{3(I_2')^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right)}{\omega_m} = \frac{3P_{AG}(1-s)}{\omega_{sm}(1-s)} = \frac{3P_{AG}}{\omega_{sm}} \tag{4}$$

Secara pendekatan dengan sisi rotor dipindah ke sisi stator, harga  $I_2$  menjadi  $I_2'$  yang sama dengan  $I_1$ , atau:

$$I_2' = \frac{V_1}{\left[ \left( R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]^{1/2}} \tag{5}$$



Gambar 5. Karakteristik Putaran Torsi Motor Induksi Untuk Efisiensi dan Faktor Daya [5]

Batas beban mulai dari nol sampai besar tertentu yang masih dapat dilayani motor (motor masih berputar) dengan pengurangan tegangan disebut beban ringan (**light load**) atau beban sebagian (**part load**). Biasanya beban ringan (rendah) berkisar antara 0% sampai 10% beban penuh.

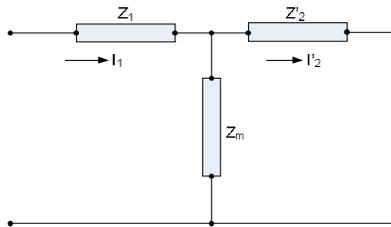
**3. Slip Optimal dan efisiensi Optimal**

Problem yang berkaitan dengan optimasi efisiensi untuk penghematan energi berkaitan dengan pengaturan keseimbangan rugi-rugi beban dengan rugi-rugi magnetisasi. Khususnya pada beban ringan, keseimbangan ini akan terganggu dan efisiensi motor akan rendah.

Diperlukan kembali pengaturan keseimbangan rugi-rugi tersebut untuk penghematan energi.

### 3.1. Efisiensi

Untuk menentukan persamaan efisiensi teoritis dalam bentuk parameter-parameter motor, rangkaian ekivalen diubah dalam bentuk rangkaian ekivalen impedansi [6].



Gambar 6. Rangkaian Ekivalen Impedansi Motor Induksi Per Fasa [6].

$Z_1$ ,  $Z_m$ , dan  $Z'_2$  dinyatakan dengan [5]:

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

$$Z_m = R_c // jX_m$$

$$Z'_2 = R'_2/s + jX'_2$$

Daya masukan pada motor dinyatakan dengan [6]:

$$P_{in} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_{in} \quad (6)$$

Dimana  $R_{in}$  adalah bagian nyata dari impedansi masukan yang dinyatakan dengan [6]:

$$R_{in} = R_1 + R_e \left( \frac{Z'_2 Z_m}{Z'_2 + Z_m} \right) \quad (7)$$

Efisiensi listrik motor dinyatakan dengan [6]:

$$\eta = \frac{P_g}{P_{in}} = \frac{I_2'^2 \cdot R'_2 (1-s)/s}{I_1^2 R_{in}} \quad (8)$$

Substitusi rumus diatas diperoleh persamaan untuk efisiensi  $\eta$  [6]:

$$\eta = \frac{1-s}{1 + \frac{2R_1}{R_c} + \frac{\alpha}{s} + s \left[ \beta - \left( 1 + \frac{2R_1}{R_c} \right) \right]} \quad (9)$$

Dimana :

$$\alpha = R_2' \left( \frac{1}{R_c} + \frac{R_1}{X_m^2} \right) + \frac{R_1 \cdot R_2'}{R_c^2} \quad (10)$$

$$\beta = 1 + \frac{R_1}{R_2'} \left( 1 + \frac{X_2'}{X_m} \right)^2 + \left( \frac{2R_1}{R_c} + \frac{X_2'}{R_2' R_c} + \frac{R_1 \cdot X_2'^2}{R_2' R_c} \right) \quad (11)$$

Slip optimal teoritis diperoleh dari diferensial (turunan) pertama efisiensi  $\eta$  terhadap  $s$  sama dengan nol [6].

$$\frac{d\eta}{ds} = \frac{d}{ds} \left[ \frac{1-s}{1 + \frac{2R_1}{R_c} + \frac{\alpha}{s} + s \left[ \beta - \left( 1 + \frac{2R_1}{R_c} \right) \right]} \right] = 0 \quad (12)$$

Operasi persamaan matematik memberikan hasil slip optimal teoritis yang dinyatakan dengan : [6]

$$S_{op} = \frac{\alpha}{\beta} \left[ \sqrt{1 + \beta/\alpha} - 1 \right] \quad (13)$$

Persamaan rumus diatas memperlihatkan bahwa slip optimal ( $s_{op}$ ) hanya bergantung parameter-parameter motor induksi dan berharga tunggal. Substitusi slip optimal ke persamaan diatas akan diperoleh efisiensi optimal teoritis sebagai berikut [6]:

$$\eta_{op} = \frac{1-s_{op}}{1 + \frac{2R_1}{R_c} + \frac{\alpha}{s_{op}} + s_{op} \left[ \beta - \left( 1 + \frac{2R_1}{R_c} \right) \right]} \quad (14)$$

## 4. Perhitungan dan Analisis

Analisis dilakukan berdasarkan model rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa dan berupa studi kepustakaan dan kajian dari buku-buku teks pendukung. Berikut ini akan diberikan contoh perhitungan slip optimal dan efisiensi optimal untuk motor-motor induksi tiga fasa kapasitas 3 HP, 5 HP, dan 7,3 HP. Motor-motor mempunyai besaran yang sama untuk tegangan, frekuensi, jumlah kutub, dan kecepatan rotor. Data untuk besaran-besaran ini adalah : 220/380 V, 50 Hz, 4 kutub, dan 1450 rpm. Kecepatan sinkron dapat dihitung sebagai berikut [3]:

$$N_s = 60f \frac{2}{P} = 60 \times 50 \times \frac{2}{4} = 1500 \text{ rpm} \quad (15)$$

Slip nominal dihitung sebagai berikut [2]:

$$S_{\text{nom}} = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0,03333$$

Harga slip nominal ini sama untuk ketiga motor yang digunakan dalam perhitungan. Besaran parameter-parameter ketiga motor dinyatakan dalam tabel berikut.

Tabel 1. Parameter-Parameter Motor Induksi Tiga Fasa [1]

Parameter	Kapasitas		
	3 HP	5 HP	7,3 HP
R <sub>1</sub> (ohm)	3,5	2,5	1,23
R <sub>2</sub> (ohm)	3,16	1,57	0,789
X <sub>1</sub> (ohm)	2,17	3,22	1,5
X <sub>2</sub> ' (ohm)	2,14	2,35	2,49
R <sub>c</sub> (ohm)	878	489	210
X <sub>m</sub> (ohm)	83,8	62,4	53,7

#### 4.1 Perhitungan untuk Motor Kapasitas 3 HP

Harga-harga koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  :

$$\begin{aligned} \alpha &= R_2' \left( \frac{1}{R_c} + \frac{R_1}{X_m^2} \right) + \frac{R_1 \cdot R_2'}{R_c^2} \\ &= 3,16 \left( \frac{1}{878} + \frac{3,5}{83,8^2} \right) + \frac{3,5 \times 3,16}{878^2} \\ &= 3,16 (0,00113 + 0,000498) + 0,0000143 \\ &= 0,005158 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= 1 + \frac{R_1}{R_2'} \left( 1 + \frac{X_2'^2}{X_m^2} \right) + \left( \frac{2R_1}{R_c} + \frac{X_2'}{R_2' R_c} + \frac{R_1 \cdot X_2'^2}{R_2' R_c} \right) \\ &= 1 + \frac{3,5}{3,16} \left( 1 + \frac{2,14^2}{83,8^2} \right) + \left( \frac{2 \times 3,5}{878} + \frac{2,14}{3,16 \times 878} + \frac{3,5 \times 2,14^2}{3,16 \times 878^2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 1 + 1,1075(1 + 0,02553)^2 + (0,00797 + \\ &0,00165 + 0,00000657) \\ &= 2,17432 \end{aligned}$$

Harga slip optimal :

$$\begin{aligned} S_{op} &= \frac{\alpha}{\beta} \left[ \sqrt{1 + \beta / \alpha} - 1 \right] \\ &= \frac{0,005158}{2,17432} \left[ \sqrt{1 + \frac{2,17432}{0,005158}} - 1 \right] \\ &= 0,002372 \times (19,5558) \\ &= 0,04638 \end{aligned}$$

Harga efisiensi optimal :

$$\begin{aligned} \eta_{op} &= \frac{1 - s_{op}}{1 + \frac{2R_1}{R_c} + \frac{\alpha}{s_{op}} + s_{op} \left[ \beta - \left( 1 + \frac{2R_1}{R_c} \right) \right]} \\ &= \frac{1 - 0,04638}{1 + \frac{2 \times 3,5}{878} + \frac{0,005158}{0,04638} + 0,04638 \left[ 2,17432 - \left( 1 + \frac{2 \times 3,5}{878} \right) \right]} \\ &= \frac{0,9536}{1,17326} \times 100 \% = 81,27 \% \end{aligned}$$

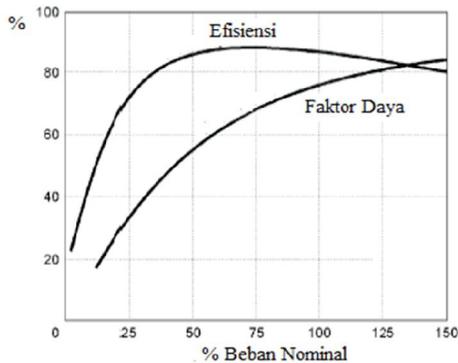
#### 4.2. Analisis

Hasil perhitungan memperlihatkan harga slip optimal untuk efisiensi optimal lebih besar dari slip nominal. Harga efisiensi optimal yang diperoleh berkisar 81%. Tabel berikut memperlihatkan hasil perhitungan slip optimal dan efisiensi optimal.

Tabel 2. Harga Slip Optimal dan Efisiensi Optimal

Kapasitas Motor	S <sub>op</sub>	η <sub>op</sub>	N <sub>r</sub> (rpm)
3 HP	0,04638	81,27 %	1430
5 HP	0,0376	81,07 %	1443
7,3 HP	0,03715	81,10 %	1444

M.M. Kostic. J menyatakan beban ringan berkisar 0% sampai 15% dari daya nominal.



Gambar 7. Kurva Standard Efisiensi Motor Induksi

Gambar 7 memperlihatkan, efisiensi motor induksi pada beban-beban ringan berkisar 40% sampai 50%. Dengan mengoptimalkan slip pada beban-beban ringan, efisiensi naik menjadi berkisar 81%. Penghematan energi akan diperoleh dengan mengoptimalkan slip dan nilai efisiensi akan diperbaiki.

## 5. Kesimpulan

Setelah melakukan analisis perhitungan dari data-data motor penulis mengambil kesimpulan bahwa dengan mengoptimalkan slip pada beban-beban ringan, efisiensi akan optimal. Ada penghematan energi yang akan diperoleh. Kurva standar efisiensi motor memperlihatkan bahwa efisiensi motor pada beban-beban ringan berkisar 40% sampai 50%. Dengan mengoptimalkan slip, efisiensi naik berkisar 81%. Ada penghematan energi yang akan diperoleh dengan mengoptimalkan slip.

## 6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada J. Manurung dan M. br Malau selaku orang tua penulis, Ir. Eddy Warman selaku dosen pembimbing, juga Ir. Surya Tarmizi Kasim, M,Si dan Ir. Syamsul Amin, M,Si selaku dosen penguji penulis yang sudah membantu penulis dalam menyelesaikan paper ini, serta teman-teman penulis yang sudah memberikan dukungan selama pembuatan paper ini.

## 7. Daftar Pustaka

- [1].M.M. Kostic, J. Radakovic, Induction Motor with YY/ $\Delta$  Connection Change for Efficiency and Power Factor Increasing at Partial Load. ELEC. ENERG, VOL. 19, 2006.
- [2].T. Phumiphak, and C. Chat-uthai, "Efficiency Optimization of Electric motors : a comparative study of stochastic algorithms", <http://www.encyclopedia.or.id>. (diakses pada tanggal 15 mei 2012).
- [3].MA. Sumanto, Motor Listrik Arus Bolak-Balik Motor Sinkron Motor Induksi, Andi Offset Yogyakarta, 1993.
- [4].Marappung Muslimin, Teknik Tenaga Listrik, Armico Bandung, 1993.
- [5].Chapman Stephen, J, Electric Machinery Fundamentals, The McGraw-Hill Companies, 1999.
- [6].Dubey Gopal J. Power Semiconductor Controlled Drives, Prentice Hall Inc, 1989.