

BAB III

PENGASUTAN (STARTING) MOTOR ARUS SEARAH

III.1. Teori umum pengasutan motor arus searah

Ada dua hal yang senantiasa menjadi persoalan pada waktu motor akan dioperasikan (start), yaitu : pertama apakah kopel awal cukup besar untuk menarik beban awal dan persoalan yang kedua adalah arus awal (I_{st}) tidak terlampau besar.

Pada motor arus searah hal yang kedua sudah langsung menjadi persoalan, sebab :

$$V = E_a + I_a \cdot R_a \quad [\text{ Volt }] \quad \dots\dots(3.1)$$

Dimana,

$$E_a = C n \Phi \quad [\text{ Volt }] \quad \dots\dots(3.2)$$

$$V = C n \Phi + I_a \cdot R_a \quad [\text{ Volt }]$$

Pada waktu start $n = 0$, jadi $E_a = 0$

Maka :

$$V = I_a \cdot R_a \quad [\text{ Volt }] \quad \dots\dots(3.3)$$

$$I_{st} = \frac{V}{R_a} \quad [\text{ Ampere }] \quad \dots\dots(3.4)$$

Bila kita misalkan :

$V = 100 \text{ Volt}$ dan $R_a = 0.1 \text{ Ohm}$,

Maka hal ini langsung akan mengakibatkan arus awal sebesar 1000 Ampere. Oleh karena menurunkan tegangan jaringan adalah sulit, maka umumnya dipakai tahanan awal dalam seri dengan tahanan jangkar, untuk menurunkan arus awal.

Pemasukan tahanan – tahanan awal ini biasanya dilakukan secara bertahap.

III.2. Cara asuatan (starting) dengan disambung langsung

Cara ini adalah yang paling sederhana dan murah, tetapi arus asut (arus startnya) besar. Kalau jangkar belum bergerak padahal jangkar biasanya mempunyai tahanan yang sangat kecil maka pada saat disambung dengan jala – jala arus jangkar (I_a) besar.

Dimana,

$$I_{st} = \frac{V}{R_a} \quad [\text{Ampere}]$$

Bial $V = 110$ Volt dan $R_a = 0.05$ Ohm, jika disambung langsung (tanpa diberi tahanan asut) maka arus startnya adalah sebesar :

$$I_{st} = \frac{110}{0.05} = 2200 \text{ Ampere}$$

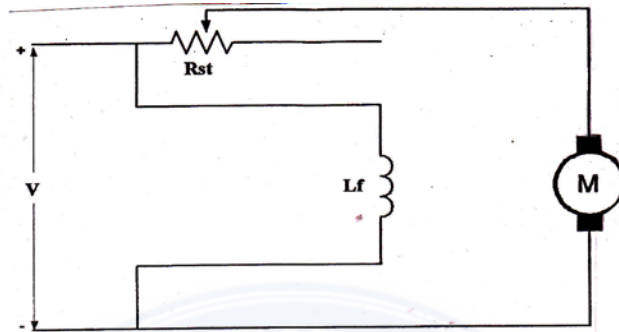
Arus ini sangat besar hingga dapat merusak kumparan jangkarnya. Kalau motornya kecil bisa cepat berputar karena momen kelembaban rotornya kecil, begitu pula arus asutnya. Jadi untuk motor yang kecil bisa langsung disambung dengan sumber. Ketika motor belum berputar $E = 0$, karena besarnya GGL lawan (E) adalah :

$$E = C n \Phi \quad [\text{Volt}] \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

Pada waktu start $n = 0$ (belum berputar), sehingga $E = 0$, oleh karena itu pada waktu start arus besar sekali.

III.3. Cara asutan (starting) dengan rheostart

Untuk membatasi arus shunt yang besar, pada rangkaian jangkar dipasang Rheostart.



Gambar 3.1. Rheostart sebagai Tahanan Asut pada Motor Shunt

Mula – mula seluruh tahanan Rheostart dipakai, arus jangkar dibatasi oleh Rst, arus penguat magnet (I_m) menjadi besar. Sesudah bergerak, GGL lawan (E)

maka timbul:

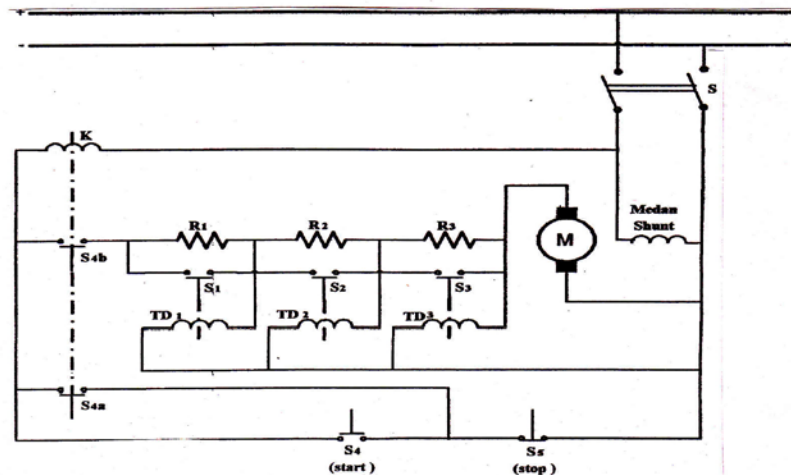
$$E = \frac{pn}{a60} \cdot Z \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \quad (\text{Volt}) \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

Dimana :

$$\frac{pn}{a60} \cdot Z \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \quad \text{adalah bilangan konstan sehingga : } E = C \cdot n \cdot \Phi$$

III.4. Start otomatis dengan menggunakan tahanan mula

Ada kalanya sebuah motor arus searah harus sering distart, sehingga dirasakan perlu menyederhanakan pekerjaan operator agar ia cukup menekan tombol saja, dan proses start kemudian berjalan sendiri. Gambar 3.2 memperlihatkan skema prinsip salah satu cara untuk start otomatis, dengan mempergunakan tiga buah tahanan start R1, R2 dan R3.



Gambar 3.2. Skema Prinsip Start Otomatik dengan Menggunakan Tahanan Mula Motor Arus Searah Shunt

Dalam rangkaian seri terdapat tiga buah tahanan start R1, R2, dan R3. S adalah saklar utama.

Untuk start, saklar utama S harus terlebih dahulu ditutup. Bilamana saklar start S4 ditekan maka kumparan K akan dihidupkan, sehingga tertutup saklar - saklar S4a dan S4b. Karenanya motor mendapatkan tegangan melalui tahanan - tahanan R1, R2, dan R3, sehingga mengalir arus yang dibatasi oleh tahanan - tahanan itu.

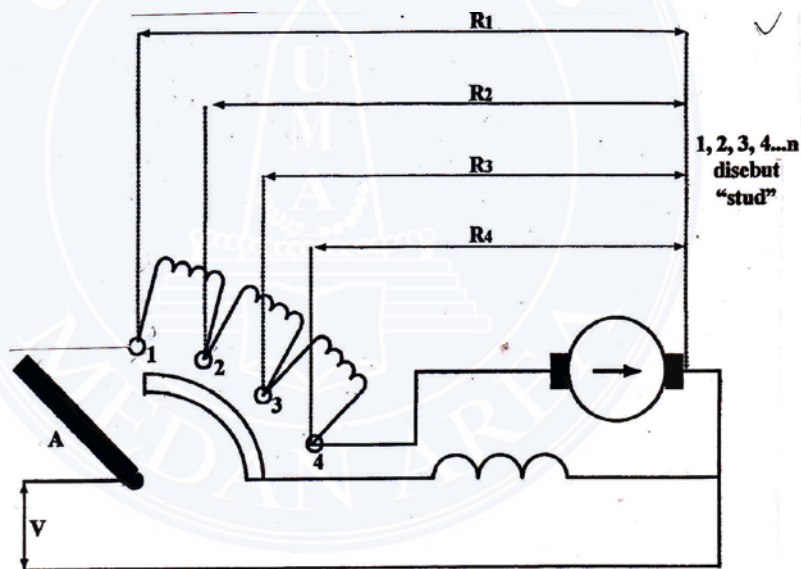
Karena lilitan shunt mendapatkan tegangan penuh, start dilakukan dengan medan shunt penuh, dan arus awal agak kecil karena R1, R2, dan R3. Motor mulai jalan, dan arus mulai mengalir. Pada suatu nilai tertentu I1 dari arus, kumparan TD1 akan dihidupkan, dan menutup saklar S1, sehingga tahanan R1 dihubung singkat.

Motor M akan mendapatkan bagian - bagian tegangan yang lebih besar, arus akan mendadak naik, kemudian mulai turun lagi, dan pada suatu nilai I2 kumparan TD2 akan dihidupkan, menarik saklar S2 sehingga tertutup tahanan R2,

dan cerita yang sama akan terjadi, menyebabkan motor M lagi mendapatkan tambahan tegangan.

Bilamana juga R3 telah dihubungkan singkat, maka motor telah mendapatkan tegangan jaringan yang penuh. Perlu dicatat bahwa pada waktu start, lilitan shunt harus mendapatkan tegangan jaringan penuh. Bilamana medan shunt memiliki tahanan pengatur perlu ada penjagaan, bahwa pada saat start tahanan pengatur ini dihubungkan singkat. Untuk berhenti maka ditekan saklar S5, sehingga kumparan K dimatikan, hal sama penyebab terputusnya rangkaian arus.

III.5. Tingkatan dari tahanan starting medan shunt



Gambar 3.3. Tingkatan Tahanan Starting

Arus maksimum

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \quad (\text{Ampere}) \quad \dots\dots(3.7)$$

Pada saat lengan A berada di "stud" 1.

Pada saat lengan A berpindah dari stud 1 ke 2, maka arus akan turun menjadi I_2

dan emf yang timbul = E_{b1} , maka berlaku hubungan :

$$I_2 = \frac{v - Eb_1}{R_2} \quad (\text{Ampere}) \quad \dots\dots(3.8)$$

Nilai n tetap, maka Eb_1 , tetap menjadi :

$$I_1 = \frac{v - Eb_1}{R_2} \quad (\text{Ampere}) \quad \dots\dots(3.9)$$

Dari persamaan (3.8) dan (3.9) :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad \dots\dots(3.10)$$

Jika A berada beberapa lama pada stud 2 dan emf naik menjadi Eb_2 , maka berlaku :

$$I_1 = \frac{v - Eb_2}{R_2} \quad (\text{Ampere}) \quad \dots\dots(3.11)$$

Demikian juga dibuat kontak pertama dengan stud n:3 maka arus :

$$I_1 = \frac{v - Eb_2}{R_3} \quad (\text{Ampere}) \quad \dots\dots(3.12)$$

Dari persamaan (3.11) dan (3.12) diperoleh :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_3} \quad (\text{Ampere}) \quad \dots\dots(3.13)$$

Bilamana lengan A berada lama di 3, maka emf naik menjadi Eb_3 dan arus turun menjadi I_2 , dimana :

$$I_2 = \frac{v - Eb_3}{R_3} \quad (\text{Ampere}) \quad \dots\dots(3.14)$$

Kalau kontak masuk pada stus 4, maka arus mengalir :

$$I_1 = \frac{v - Eb_3}{R_a} \quad (\text{Ampere}) \quad \dots\dots(3.15)$$

Dari persamaan (3.14) dan (3.15) diperoleh :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_3}{R_a} \quad (\text{Ampere}) \quad \dots\dots(3.16)$$

Dari persamaan (3.10), (3.13), dan (3.16) kita lihat bahwa :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_3} = \frac{R_3}{R_a} = K \quad \dots\dots\dots(3.17)$$

Maka :

$$R_3 = K R_a$$

$$R_2 = K R_3 = K^2 R_a$$

$$R_1 = K R_2 = K K^2 R_a = K^3 R_a$$

Dalam bentuk umum :

Misalkan :

n = banyak stud hidup (live stud)

$(n - 1)$ = banyak bagian tahanan depan, maka :

$$R_1 = K^{n-1} . R_a$$

$$\frac{R_1}{R_a} = K^{n-1} \quad \text{atau} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_a}$$

Dengan beberapa formulasi diatas akan kita terapkan pada motor yang akan dicoba di laboratorium nanti.

Seperti telah disebutkan pada bab pendahuluan sebelumnya bahwa data – data dari motor yang akan dicoba adalah :

Jenis : Motor arus searah penguatan bebas

Kapasitas : 2000 Watt

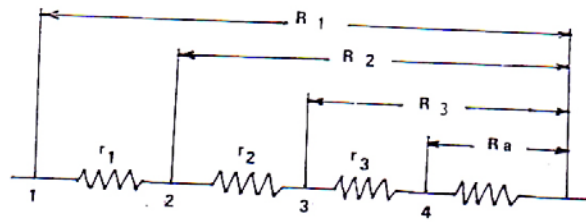
Tegangan : 220 Volt

Ia nominal : 9.1 Ampere

n nominal : 1500 rpm

Klas Isolasi : B

Perhitungan :



$$P = 2000 \text{ Watt}$$

$$V_t = 220 \text{ Volt}$$

$$I_a = 9.1 \text{ Ampere}$$

$$R_a = 0.25 \text{ Ohm}$$

Arus start motor diambil 1.6 kali arus nominal motor,

$$I_{st} = 1.6 \cdot I_a$$

$$= 1.6 \cdot 9.1$$

$$I_{st} = 14.56 \text{ Amp} \sim 15 \text{ Amp}$$

$$R_1 = \frac{V_t}{I_{st}}$$

$$R_1 = \frac{220}{15} = 14.67 \text{ Ohm}$$

$$R_1 = K^{n-1} \cdot R_a$$

$$14.67 = K^{4-1} \cdot 0.25$$

$$14.67 = K^3 \cdot 0.25$$

$$K = \sqrt[3]{14.67 / 0.25}$$

$$K = 3.89$$

$$R_2 = \frac{R_1}{K}$$

$$R_2 = \frac{14.67}{3.89} = 3.77 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = \frac{R_2}{K}$$

$$R_3 = \frac{3.77}{3.89} \sim 1.0 \text{ Ohm}$$

Tahanan bahagian :

$$\text{Bahagian 1 : } r_1 = R_1 - R_2 = 14.67 - 3.77 = 10.90 \text{ Ohm}$$

$$2 : r_2 = R_2 - R_1 = 3.77 - 1.00 = 2.77 \text{ Ohm}$$

$$3 : r_3 = R_3 - R_a = 1.00 - 0.25 = 0.75 \text{ Ohm}$$

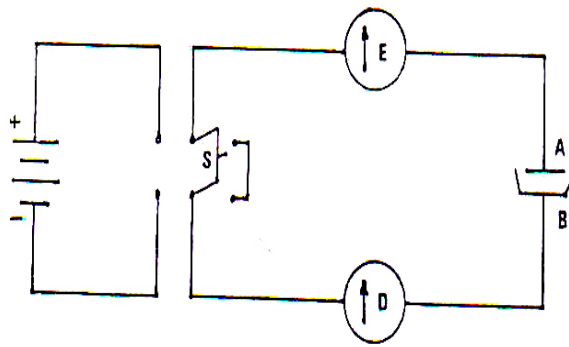
III.5.1. Tahanan sirkit kontrol arus searah

Pemakaian tahanan pada sirkit kontrol DC adalah sebagai komponen tempat pelepasan muatan (discharge) kapasitor C yang telah dimuati dan untuk menentukan besarnya tahanan yang dipergunakan akan dijelaskan pada bagian III.5.2.

III.5.2. Capasitansi (C)

Kapasitor pada umumnya terdiri dari dua permukaan konduktor yang diparalelkan dan dipisahkan oleh suatu medium yang disebut dengan dielektrik. Permukaan konduktor dapat berbentuk plat lingkaran (circular) atau plat persegi. Tipe kapasitor yang umumnya digunakan dalam sistem tenaga dan sirkit komunikasi adalah kapasitor plat sejajar.

Kapasitor dapat merupakan sumber energi. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 3.4 dibawah ini yaitu sebuah kapasitor plat sejajar AB yang dihubungkan seri dengan dua buah galvanometer (alat untuk mendeteksi arus listrik) D dan E, juga saklar S yang disusun sedemikian rupa yaitu untuk menghubungkan kapasitor tersebut dengan sumber tegangan searah (batere) atau untuk menghubungkan singkatkan terminal – terminal dari kapasitor tersebut.



Gambar 3.4. Kapasitor AB adalah dimuati (charge) bila saklar menutup kekiri dan melepaskan muatan (discharge) bila saklar ditutup kekanan.

Kekuatan dari kapasitor untuk menyimpan energi listrik disebut dengan kapasitansi dimana besar dari kapasitansi tersebut dapat diturunkan sebagai berikut :

$$E = \frac{Q}{\epsilon A} \dots\dots(a)$$

Juga :

$$E = \frac{V}{d} \dots\dots(b)$$

Substitusi persamaan (b) pada (a),

$$\frac{V}{d} = \frac{Q}{\epsilon \cdot A}$$

$$\frac{Q}{V} = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$$

Jadi kapasitansi plat sejajar adalah :

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \dots\dots(3.18)$$

Dimana :

$C = \text{Capasitansi (Farad)}$

$Q = \text{muatan (coulomb)}$

$V = \text{tegangan antara plat (Volt)}$

$\varepsilon = \text{permeabilitas bahan dielektrik (Farad/m)}$

$d = \text{jarak antara kedua plat (Meter)}$

$A = \text{luas penampang plat (meter}^2 \text{)}$

Pada keadaan pelepasan muatan (discharge), energi yang tersimpan akan dikeluarkan dan besar energi yang disalurkan sebuah kapasitor adalah sebagai berikut :

$$Q = C.V \quad \text{.....(3.19)}$$

$$dQ = C.dV$$

karena :

$$dW = V. dQ, \text{ maka :}$$

$$dW = C.V.dV$$

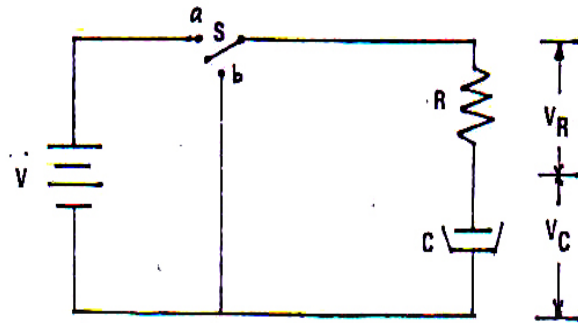
atau :

$$w = \frac{C.V^2}{2} \quad \text{.....(3.20)}$$

III.5.3. Penentuan waktu dengan mempergunakan komponen RC

Seperti telah dijelaskan pada bagian III.4 bahwa salah satu sifat dari kapasitor adalah apabila sebuah kapasitor dimuati atau dihubungkan dengan sumber arus searah maka kapasitor tersebut akan dimuati (diisi) sampai beda potensial antara kedua pat dari kapasitor sama dengan beda potensial sumber arus searah. Selanjutnya kaki (terminal) kapasitor dilepaskan dari hubungan dengan

tahanan R sehingga kapasitor C akan menyalurkan energi listrik yang tersimpan tadi melalui tahanan R tersebut. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Rangkaian Pengisian dan Pelepasan Muatan Kapasitor C

Misalkan sebelum $t = 0$, saklar s berada pada posisi a, berarti terjadi pengisian (charge) pada kapasitor sampai tercapainya keadaan steady state yaitu tegangan kapasitor V_c sama dengan tegangan sumber V.

Setelah hal tersebut diatas tercapai, saklar s dipindahkan pada posisi b, ini berarti terjadi pengosongan muatan (discharge) dari kapasitor C melalui tahanan R dengan arah arusnya berlawanan dengan arah arus pengisian.

Persamaan rangkaian setelah $t = 0$, adalah :

$$V_r + V_c = 0$$

$$R.i + \frac{1}{c} \int i.dt = 0$$

Penyelesaian secara matematis menghasilkan :

$$I = K. e^{-t/RC} \quad \dots\dots(3.21)$$

Untuk menentukan konstanta K, kita atur $t = 0$ dari persamaan (3.21) dan substitusi initial current i_0 . Kapasitor discharge dengan tegangan V yang polaritasnya seperti gambar di atas, initial current berlawanan terhadap arus tersebut, sehingga :

$$i_0 = -\frac{V}{R} \quad \dots\dots(3.22)$$

substitusi persamaan 3.21 pada 3.22 untuk harga $t=0$

$$-\frac{V}{R} = K.e^0$$

$$-\frac{V}{R} = k.1$$

$$K = -V/R \quad \dots\dots(3.23)$$

Substitusi persamaan 3.23 pada 3.21

$$i = -\frac{V}{R} e^{-t/RC} \quad \dots\dots(3.24)$$

pada proses discharge berarti terjadi penurunan tegangan dari kapasitor tersebut.

Persamaan tegangan kapasitor :

$$V_c = \frac{1}{c} \int i.dt$$

$$V_c = -\frac{1}{c} \int \frac{V}{R} e^{-t/RC} dt$$

$$V_c = V.e^{-t/RC} \quad \dots\dots(3.25)$$

Dimana :

RC = time constant

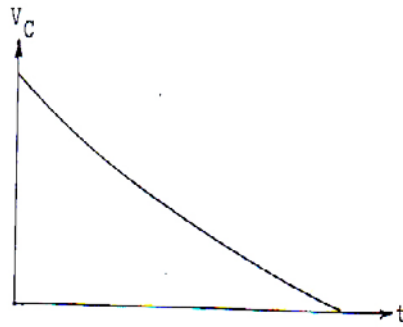
T = waktu discharge

V = tegangan sumber

Dari persamaan 3.25, bentuk tegangan V_c sebagai fungsi dari waktu t dapat di gambarkan seperti Gambar 3.6 berikut.

Untuk menentukan harga waktu discharge t , dapat diturunkan dari persamaan 3.26, dimana diperoleh :

$$T = RC.\ln \frac{V_c}{V} \quad \dots\dots(3.26)$$



Gambar 3.6. Grafik Penurunan Tegangan Kapasitor sebagai Fungsi dari Waktu Discharge

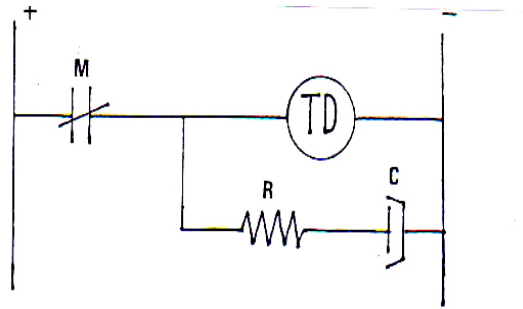
Dari persamaan 3.26 dapat kita lihat bahwa besarnya waktu discharge dapat dibuat bervariasi yaitu dengan merubah-ubah besar tahanan R dan kapasitor C. Dalam percobaan yang dilakukan, variasi waktu tersebut akan dilakukan dengan membuat variasi terhadap besaran tahanan R dan kapasitor C.

Contoh : **Tabel.1.** Besaran Tahanan dan Kapasitor

No	Tahanan (Ohm)	Kapasitor (μF)
1	220.0	14100
2	220.0	16100
3	26.4	16100
4	26.4	14100

Perlu ditambahkan disini bahwa untuk menggerakkan atau memindahkan posisi saklar dilakukan secara otomatis yaitu dengan menggunakan kontaktor yang digerakkan oleh rele elektromagnetik.

Dengan memanfaatkan gejala transien dari sirkit RC itulah untuk menentukan tundaan (keterlambatan) waktu dari rele yang ditempatkan pada sirkit kontrol DC seperti Gambar berikut.



Gambar 3.7. Aplikasi Komponen RC untuk Menentukan Keterlambatan Waktu rele TD.

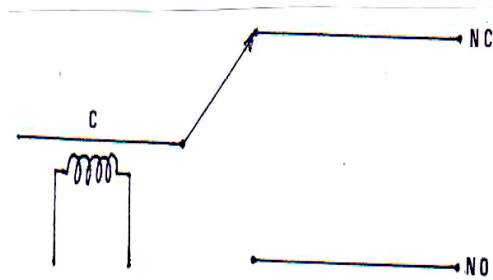
III.5.4. Rele

Ditinjau dari tegangan kerja dari rele, maka rele ini dapat digolongkan kedalam 2 kategori, yaitu :

1. Rele yang bekerja dengan arus searah, dan
2. Rele yang bekerja dengan arus bolak balik.

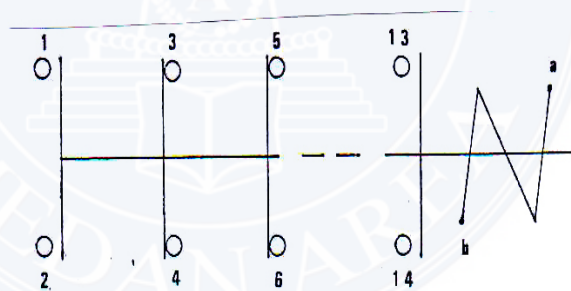
Untuk keperluan menjalankan motor arus searah penguatan bebas dengan pengaturan tahanan depan oleh rele keterlambatan waktu yang mempergunakan komponen RC, maka disini dipakai kedua jenis rele tersebut, yaitu berupa control relay dan auxiliary relay.

Control relay adalah rele yang bekerja dengan sumber arus searah, dipakai pada sirkit kontrol DC, dengan tegangan kerja = 12 volt. Dalam pemakaiannya pada percobaan dilaboratorium (aplikasi), jenis rele kontrol yang dipakai adalah cukup rele dengan rating arus yang kecil (\pm 0.5 Ampere) seperti yang sering dipakai pada rangkaian elektronika. Rele ini biasa juga disebut dengan rele single pole-single throw. Bentuk wiring dari control relay ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.8. Bentuk Wiring dari Contoh Relay

Auxiliary relay adalah rele yang bekerja dengan sumber arus bolak – balik, dipakai pada sirkit kontrol AC, dengan tegangan kerja = 220 volt. Jenis auxiliary relay yang dipakai adalah type : SRCa 5.-3, terdiri dari empat buah kontaktor, masing – masing 2 (dua) buah Normally Open (NO) dan 2 (dua) buah Normally Close (NC). Banyaknya jenis rele yang dipakai adalah 4 (empat) buah. Bentuk susunan kontaktor (contact arrangement) dari rele type : SRCa 5.-3 adalah seperti Gambar 3.9 dibawah ini.



Gambar 3.9. Susunan Kontaktor dari Rele Type SRCa 50-3

III.6 Alat untuk pengasutan motor arus searah shunt (starting)

Untuk pengasutan (starting) motor arus searah, alat yang sering dipergunakan adalah :

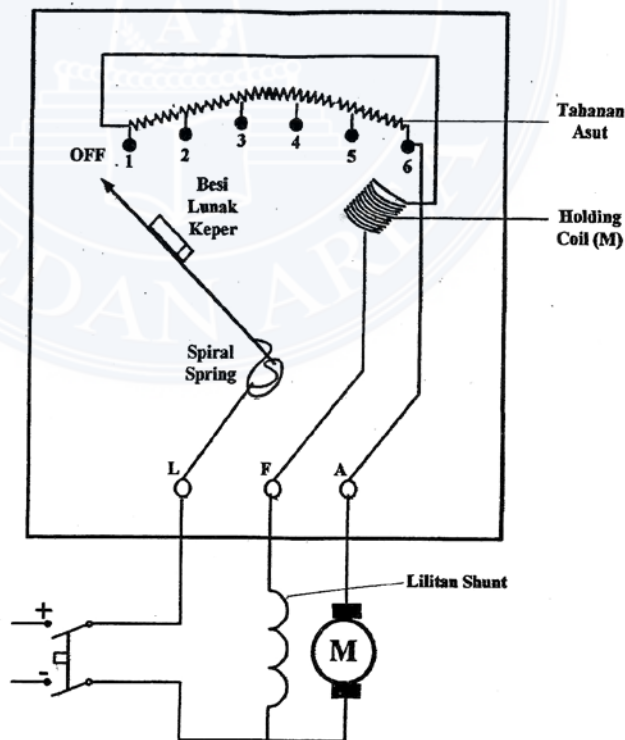
1. Three-point (tiga ujung) starting rheostat,
2. Four-point (empat ujung) starting rheostart, dan
3. Automatic starter.

III.6.1. Three-point (tiga ujung) starting rheostat

Dikatakan Three-point (tiga ujung) starting rheostat karena pada terminal terdapat tiga ujung, yaitu A (armature), F (field), dan L (line). Pada three-point dilengkapi dengan holding coil, yang gunanya adalah melindungi motor bila ada gangguan sumber tenaga.

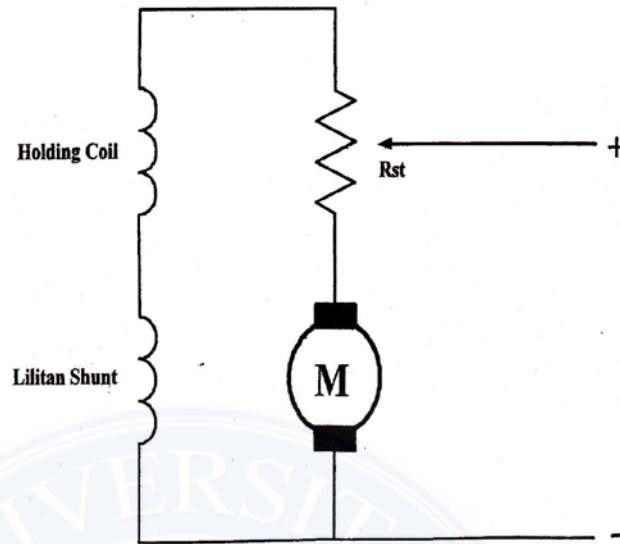
Bila $I = 0$, kemagnetan dalam holding hilang sehingga pegas menarik lengan (engkol) dan kembali kedudukan off. Oleh karena itu, apabila tegangan sumber hidup kembali, jangkar tidak akan mengalami kerusakan. Juga apabila penguat terputus, ini akan berbahaya karena kalau engkol tidak kembali pada kedudukan off putaran motor menjadi sangat cepat dan berbahaya.

Pada Three-point (tiga ujung) starting rheostat holding coil (M) dipasang seri terhadap lilitan penguat magnet.



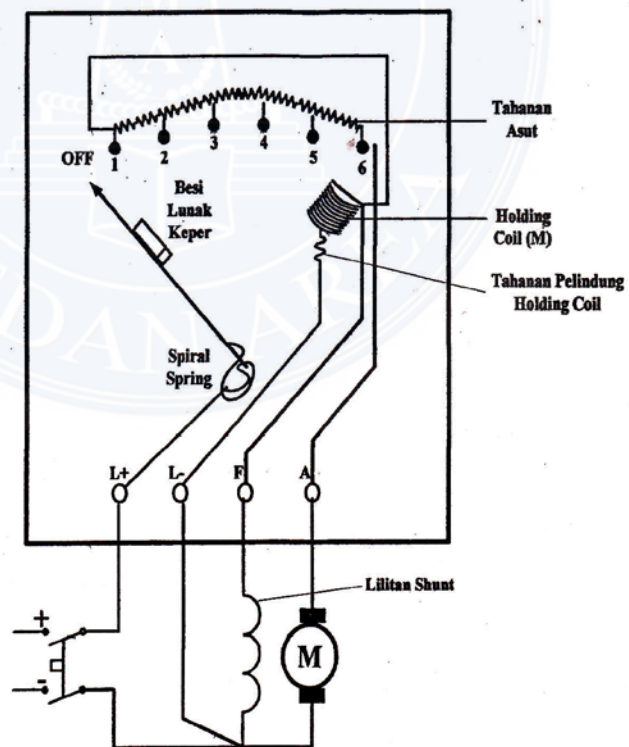
Gambar 3.10. Three-Point Starting Rheostat yang dipasang pada Motor Shunt

Rangkaian ekivalen dari Gambar 3.10 di atas adalah :



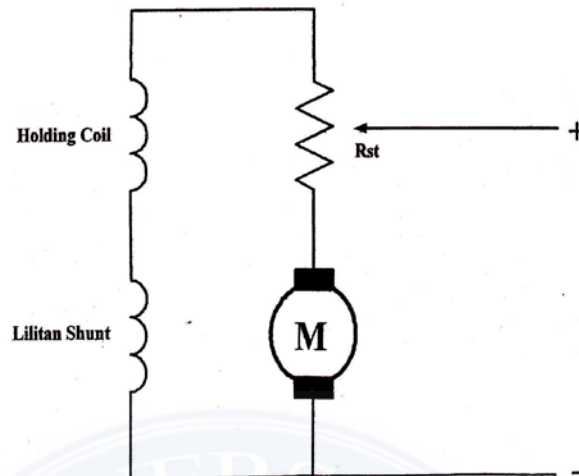
Gambar 3.11. Rangkaian Ekivalen Three-Point Starting Rheostat

III.6.2. Four-point (empat ujung) starting rheostat



Gambar 3.12. Four-Point Starting dipasang pada Motor DC Shunt

Rangkaian ekivalen dari Gambar 3.12 adalah :



Gambar 3.13. Rangkaian Ekivalen four-Point Starting Rheostat

Pada four-point starting terdapat empat ujung yaitu : L+ (line), L- (line), F (field), dan A (Armature). Pada four-point starting rheostat juga dilengkapi dengan holding coil (M).

Guna holding coil adalah untuk melindungi motor bila ada gangguan sumber tenaga. Bila $I = 0$, kemagnetan pada holding coil hilang sehingga pegas menarik lengan (engkol) dan kembali kekedudukan off. Oleh karena itu apabila tegangan sumber hidup lagi, jangkar tidak akan mengalami kerusakan.

Juga apabila rangkaian terputus, ini akan berbahaya, karena kalau engkol tidak kembali pada kedudukan off, putaran menjadi sangat cepat dan berbahaya. Pada four-point starting rheostat holding coil (M) dipasang paralel terhadap jala – jala. Jika engkol tidak pada posisi off harus jala – jala terbagi tiga (tiga) bagian :

1. Rangkaian jangkar terdiri atas R_a , R_{se} , R_{st} ,
2. Rangkaian holding coil terdiri atas holding coil dan R (tahanan untuk pelindung arus), dan
3. Rangkaian penguat shunt (R_{sh}).

Dengan susunan seperti diatas perubahan arus penguat tidak akan mempengaruhi arus pada holding coil.

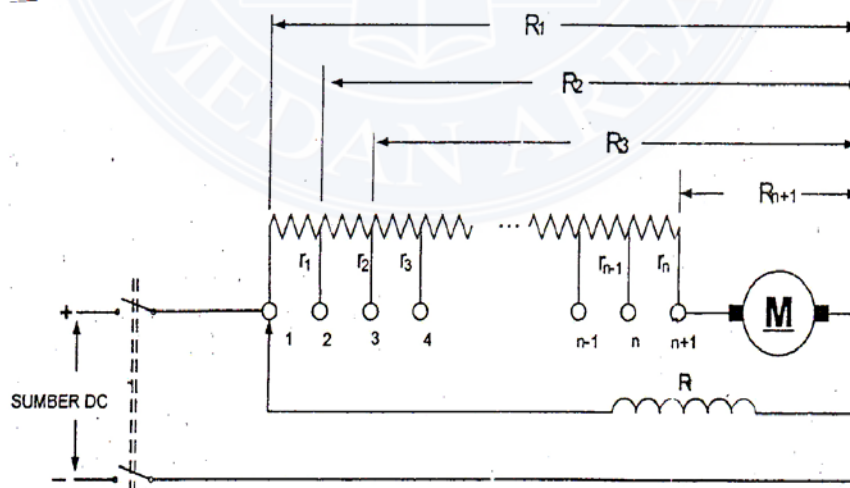
III.6.3. Pengasutan otomatis (automatic starter)

Menstart motor arus searah selain dengan cara manual, juga banyak dipergunakan dengan cara otomatis (automatic starter). Automatic starter mempunyai kontaktor yang digerakan secara elektromagnetik.

Kerja elektromagnetik sudah diatur sebelumnya sehingga kerja kontaktor berurutan dengan teratur. Kontaktor – kontaktor tersebut mengatur tahanan yang tersambung sehingga membatasi arus pada waktu pengasutan.

III.7. Rancangan tahanan mula

Prinsip dalam merancang tahanan mula dapat dijelaskan dari Gambar 3.14 dibawah. Gambar 3.14 adalah motor arus searah penguatan shunt yang telah dirangkai seri dengan jangkar.



Gambar 3.14. Motor Arus Searah Penguatan Shunt dengan Tahanan Mula

Berdasarkan gambar 3.14 di atas, dimisalkan ada tahanan mula ($r_1, r_2, r_3, \dots, r_{n-1}, r_n$) sebanyak n tahanan yang seri dengan tahanan jangkar maka diperoleh tahanan langkah R_1 :

$$R_1 = (r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n) + R_a \quad \dots\dots\dots(3.27)$$

Dan R_2 adalah :

$$R_2 = (r_2 + r_3 + r_4 + \dots + r_n) + R_a \quad \dots\dots\dots(3.28)$$

Dan begitu pula dengan R_3, R_4 sampai akhirnya kepada $R_{n+1} = R_a$

$$R_{n+1} = R_a \quad \dots\dots\dots(3.29)$$

Misalkan: $\frac{I_{maks}}{I_{min}} = \alpha \quad \dots\dots\dots(3.30)$

Pada motor arus searah penguatan shunt fluksi medan dianggap konstan, sehingga pergantian tahanan secara bertahap akan menghasilkan relasi :

$$\frac{I_{maks}}{I_{min}} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_3} = \dots\dots = \frac{R_n}{R_{n+1}} = \alpha \quad \dots\dots\dots(3.31)$$

$$\alpha^n = \frac{R_1}{R_2} \times \frac{R_2}{R_3} \times \dots\dots \times \frac{R_n}{R_{n+1}} = \frac{R_1}{R_{n+1}} = \frac{R_1}{R_a}$$

$$\alpha = \sqrt[n]{\frac{R_1}{R_a}} \quad \dots\dots\dots(3.32)$$

$$n = \frac{\ln R_1 / R_a}{\ln \alpha} \quad \dots\dots\dots(3.33)$$

n adalah banyaknya kancing yang disentuh tangkai pengasut/ engkol.

Dengan mendapatkan harga $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ maka akan diperoleh tahanan mula r_1, r_2 dan seterusnya. Besarnya tahanan langkah $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n, R_{n+1}$, adalah :

$$\blacksquare R_1 = \frac{V_1}{I_{maks1}} \quad \dots\dots(3.34)$$

$$\blacksquare R_2 = \frac{R_1}{\alpha}$$

$$\blacksquare R_n = \frac{R_{n+1}}{\alpha} \quad \dots\dots(3.35)$$

Maka tahanan mula r_1, r_2, r_n dapat diperoleh yakni :

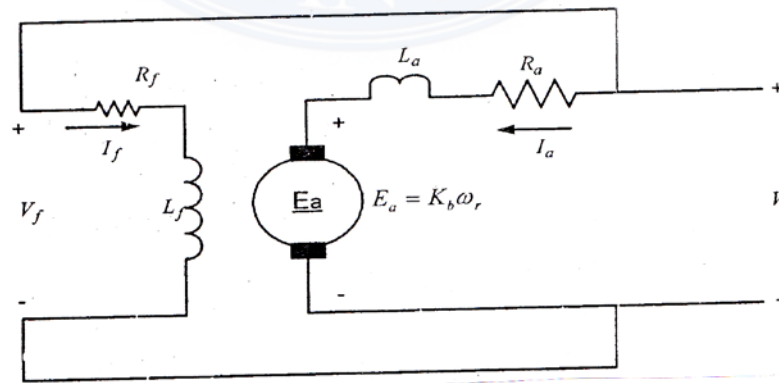
$$r_1 = R_1 - R_2$$

$$r_2 = R_2 - R_3$$

$$r_n = R_n - R_{n+1} \quad \dots\dots(3.36)$$

III.8. Pengasutan motor shunt pada keadaan dinamis

Rangkaian motor arus searah pada keadaan sebenarnya juga terdapat induktansi kumparan jangkar (L_a) dan induktansi kumparan medan (L_f) dapat dilihat pada gambar 3.15 di bawah.



Gambar 3.15. Rangkaian motor arus searah penguatan shunt dengan induktansi jangkar dan induktansi medan

Pada motor arus searah penguatan shunt fluksi medan dianggap konstan maka persamaan dapat di tuliskan sebagai berikut :

$$E_a = K \omega_r \quad \phi_f = K_b \omega_r \quad \dots\dots\dots(3.37)$$

Dimana :

$$K_b = K \quad \phi_f \text{ (Volt/(Rad/S))} \quad \dots\dots\dots(3.38)$$

Fluksi yang dihasilkan dari belitan medan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\phi_f = \frac{N_f I_f}{\mathfrak{R}_m} \quad \dots\dots\dots(3.39)$$

Dimana : ϕ_f = fluksi perkutub (Weber)

N_f = jumlah lilitan pada belitan medan

\mathfrak{R}_m = reluktansi dari lintasan bersama anantara belitan medan dengan belitan Jangkar.

Apabila persamaan 3.39 disubsitusi ke persamaan 3.38 maka di peroleh:

$$K_b = K \frac{N_f I_f}{\mathfrak{R}_m} \quad \dots\dots\dots(3.40)$$

$$K_b = K \frac{N_f I_f}{\mathfrak{R}_m} = L_{af} I_f \quad \dots\dots\dots(3.41)$$

$$L_{af} = \frac{KN_f}{\mathfrak{R}_m} = \frac{P}{\pi} \frac{Z}{2a} \frac{N_f}{\mathfrak{R}_m} \quad \dots\dots\dots(3.42)$$

Dimana L_{af} adalah induktansi bersama antara belitan medan dengan belitan jangkar. Dengan demikian persamaan 3.37 dapat kembali di tuliskan sebagai berikut :

$$E_a = K_b \omega_r = L_{af} I_f \omega_r \quad \dots\dots\dots(3.43)$$

Pada keadaan dinamis, torsi yang dihasilkan oleh motor dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T_{ind}(t) = T_L(t) + D\omega_r(t) + J \frac{d\omega_r(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots(3.44)$$

Apabila nilai D (konstanta Redaman) diabaikan maka persamaan diatas dapat dituliskan kembali sebagai berikut :

$$T_{ind}(t) = T_L(t) + J \frac{d\omega_r(t)}{dt} \quad \dots\dots(3.45)$$

$$T_{ind}(t) = T_L(t) + J[s\omega_{r(n)}(s) - \omega_{r(n-1)}(s)]$$

$$K_b I_a(s) = T_L(s) + J[s\omega_{r(n)}(s) - \omega_{r(n-1)}(s)] \quad \dots\dots(3.46)$$

Dan begitu juga halnya dengan tegangan terminal motor (V_i) dalam keadaan dinamis dapat dituliskan kembali sebagai berikut :

$$V_i(t) = I_a(t)R_{mula} + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E_a(t) \quad \dots\dots(3.47)$$

Dengan mengubah persamaan diatas kedalam bentuk laplace, maka :

$$V_i(s) = I_{a(n)}(s)R_{mula} + L_a[sI_{a(n)}(s) - I_{a(n-1)}(s)] + E_{a(n)}(s)$$

$$V_i(s) = I_{a(n)}(s)(R_{mula} + L_a s) - L_a I_{a(n-1)}(s) + K_b \omega_{r(n)}(s) \quad \dots\dots(3.48)$$

$$\omega_{r(n)}(s) = \frac{K_b [V_i(s) - L_a I_{a(n-1)}(s)] + [J\omega_{r(n-1)}(s) - T_L(s)](R_{mula} + L_a s)}{J s(R_{mula} + L_a s) + K_b^2} \quad \dots\dots(3.49)$$

$$I_{a(n)}(s) = \frac{[V_i(s) + L_a I_{a(n-1)}(s)] J s - K_b [J\omega_{r(n-1)}(s) - T_L(s)]}{J s(R_{mula} + L_a s) + K_b^2} \quad \dots\dots(3.50)$$

Dimana :

$I_{a(N)}(S)$ = arus jangkar pada saat $t = t_n$ (Amp)

$I_{a(n-1)}(S)$ = arus jangkar pada saat $t = t_{n-1}$ (Amp)

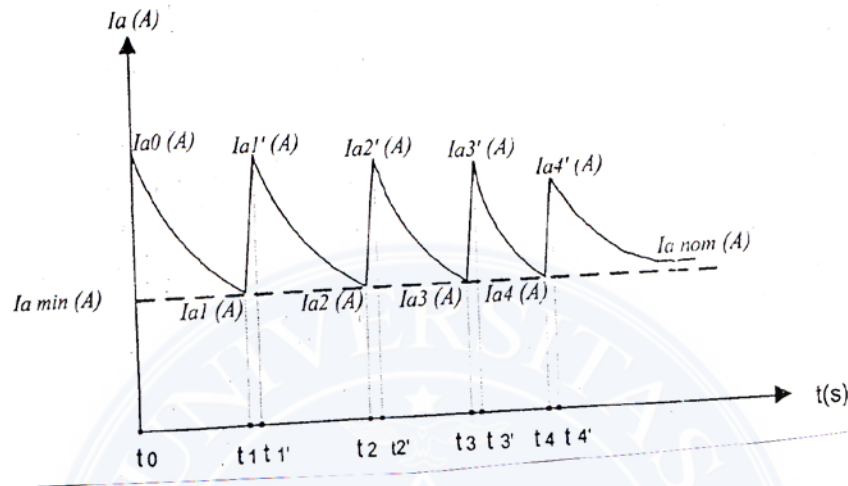
$\omega_{r(n)}(S)$ = kecepatan putar pada saat $t = t$ (rad/dtk)

$\omega_{r(n-1)}(S)$ = kecepatan putar pada saat $t = t_{n-1}$ (rad/dtk)

J = momen inersia ($Kg.m^2$)

$T_L(S)$ = torsi beban (N.m)

Adapun karakteristik arus start motor arus searah penguatan shunt selama pengasutan dengan memperhitungkan adanya induktansi jangkar dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16. Arus start motor karena adanya induktansi jangkar selama pengasutan

Gambar 3.16 diatas dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada saat motor pertama kali diasut ($t_0 = 0$) putaran dan torsi motor adalah nol dan juga $L_a \frac{dI_a}{dt} = 0$, sehingga persamaan pada saat motor pertama kali diasut adalah :

$$I_a(S)_{maks} = \frac{V_t(S)}{R_1} \dots\dots\dots(3.51)$$

Ketika tangkai pengasutan masih berada pada kancing pertama (selang waktu $t_0 \rightarrow t_1$) mulai timbul torsi sehingga timbullah putaran dan ggl induksi lawan. Timbulnya ggl induksi lawan ini mengakibatkan arus jatuh menjadi minimum. Putaran motor mulai naik selang waktu t_0 , besarnya arus dan putaran motor pada saat minimum ($t = t_1$) adalah :

$$I_{a1}(s) = \frac{[V_t(S) + L_a I_{a0}(0)]Js + K_b T_L(S)}{Js(R_1 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.52)$$

$$\omega_{r1}(S) = \frac{K_b [V_t(S) - L_a I_{a0}(0)] - T_L(S)(R_1 + L_a S)}{Js(R_1 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.53)$$

Adapun ggl induksi lawan dan torsi induksi yang terjadi pada saat minimum ($t = t_1$) adalah :

$$E_{a1}(S) = K_b \omega_{r1}(S) \dots\dots\dots(3.54)$$

$$T_{ind1}(S) = K_b I_{a1}(S) \dots\dots\dots(3.55)$$

Pada saat tangkai pengasut berpindah ke kancing 2 (dimana tahanan pada rangkaian jangkar adalah R_2) arus yang mengalir pada jangkar kembali menjadi maksimum pada saat $t = t_1'$. Pergeseran waktu dari $t \rightarrow t_1'$ ini disebabkan oleh adanya induktansi jangkar pada rangkaian. Adanya induktansi jangkar ini mengakibatkan arus maksimum pada saat $t = t_1'$ menjadi lebih kecil dari pada arus maksimum sebelumnya ($t = t_0$) dan hal ini akan terjadi terus – menerus pada saat $t = t_2'$, $t = t_3'$ dst. Putaran dan ggl induksi lawan akan berubah oleh karena $L_a \frac{dI_a}{dt} \neq 0$ dan $J \frac{d\omega_r(t)}{dt} \neq 0$. Dengan demikian pada saat $t = t_1'$, $t = t_2'$, $t = t_3'$ dst, nilai – nilai dari putaran, arus maksimum, torsi, dan ggl induksi lawan yang terjadi adalah ω_{r1}' , T_{ind1}' , I_{amaks1}' , E_{a1}' , dst. Adapun selisih waktu antara $t_1 \rightarrow t_1'$, $t_2 \rightarrow t_2'$, $t_3 \rightarrow t_3'$, dst, yang diakibatkan oleh induktansi jangkar adalah sangat kecil sekali. Maka dari itu arus maksimum, putaran, ggl induksi lawan dan torsi induksi yang terjadi pada saat $t = t_1'$ adalah :

$$\omega_{r1}'(S) = \frac{K_b [V_t(S) - L_a I_{a1}(S)] + [J\omega_{r1}(S) - T_L(S)](R_2 + L_a S)}{Js(R_2 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.56)$$

$$I_{a1}'(S) = \frac{[V_t(S) + L_a I_{a1}'(S)]Js - K_b [J\omega_{r1}(S) - T_L(S)]}{Js(R_2 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.57)$$

$$E_{a1}'(S) = K_b \omega_{r1}'(S) \dots\dots\dots(3.58)$$

$$T_{ind}'(S) = K_b I_{a1}'(S) \dots\dots\dots(3.59)$$

Selang waktu $t \rightarrow t_2$ ', putaran dan ggl induksi lawan semakin bertambah sehingga mengakibatkan arus kembali jatuh menjadi minimum ($t = t_2$). Adapun besarnya arus minimum dan putaran motor tersebut pada saat ($t = t_2$) adalah :

$$\omega_{r2}(S) = \frac{K_b [V_t(S) - L_a I_{a1}'(S)] + [J\omega_{r1}'(S) - T_L(S)](R_2 + L_a S)}{Js(R_2 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.60)$$

$$I_{a2}(S) = \frac{[V_t(S) + L_a I_{a1}'(S)]Js - K_b [J\omega_{r1}'(S) - T_L(S)]}{Js(R_2 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.61)$$

Besarnya ggl induksi lawan dan torsi yang terjadi pada saat minimum ($t = t_2$) adalah :

$$E_{a2}(S) = K_b \omega_{r2}(S) \dots\dots\dots(3.62)$$

$$T_{ind2}(S) = K_b I_{a2}(S) \dots\dots\dots(3.63)$$

Setelah tangkai asut berpindah dimana tahanan pada jangkar adalah R_3 , arus kembali maksimum yakni pada saat $t = t_2$ ' dan nilai arus maksimum ini semakin berkurang dari pada arus maksimum sebelumnya ($t = t_1$ '). Maka dari itu arus maksimum, putaran, ggl induksi lawan dan torsi induksi yang terjadi pada saat $t = t_2$ ' adalah :

$$\omega_{r2}'(S) = \frac{K_b [V_t(S) - L_a I_{a2}(S)] + [J\omega_{r2}(S) - T_L(S)](R_3 + L_a S)}{Js(R_3 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.64)$$

$$I_{a2}'(S) = \frac{[V_t(S) + L_a I_{a2}'(S)]Js - K_b [J\omega_{r2}'(S) - T_L(S)]}{Js(R_3 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.65)$$

$$E_{a2}'(S) = K_b \omega_{r2}'(S) \dots\dots\dots(3.66)$$

$$T_{ind2}'(S) = K_b I_{a2}'(S) \dots\dots\dots(3.67)$$

Kemudian arus kembali menjadi minimum pada saat $t = t_3$, arus minimum dan putaran yang terjadi pada saat $t = t_3$ adalah :

$$\omega_{r3}(S) = \frac{K_b [V_t(S) - L_a I_{a2}'(S)] + [J\omega_{r2}'(S) - T_L(S)](R_3 + L_a S)}{Js(R_3 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.68)$$

$$I_{a3}(S) = \frac{[V_t(S) + L_a I_{a2}'(S)]Js - K_b [J\omega_{r2}'(S) - T_L(S)]}{Js(R_3 + L_a S) + K_b^2} \dots\dots\dots(3.69)$$

Besarnya ggl induksi lawan dan torsi yang terjadi pada saat minimum ($t = t_3$) adalah:

$$E_{a3}(S) = K_b \omega_{r3}(S) \dots\dots\dots(3.70)$$

$$T_{ind3}(S) = K_b I_{a3}(S) \dots\dots\dots(3.71)$$

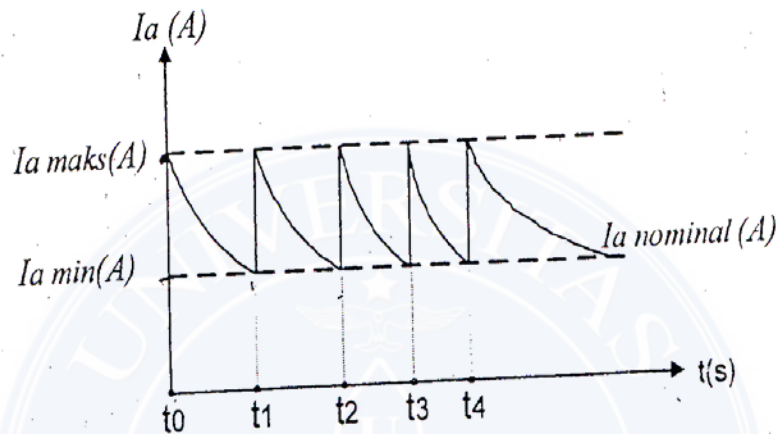
Demikianlah seterusnya sampai akhirnya seluruh tahanan mula terpangkas dan pada akhirnya motor berputar dengan kecepatan putar nominalnya. Namun apabila induktansi jangkar motor tersebut sangat kecil sekali, maka nilainya dapat diabaikan. Dengan mengabaikan induktansi jangkar maka persamaan 3.49 dan persamaan 3.50 menjadi :

$$\omega_{r(n)}(S) = \frac{K_b V_t(S) + [J\omega_{r(n-1)}(S) - T_L(S)]R_{mula}}{JsR_{mula} + K_b^2} \dots\dots\dots(3.72)$$

$$I_{a \min}(S) = \frac{JsV_1(S) - K_b [J\omega_{r(n-1)}(S) - T_L(S)]}{JsR_{mula} + K_b^2} \dots\dots\dots(3.73)$$

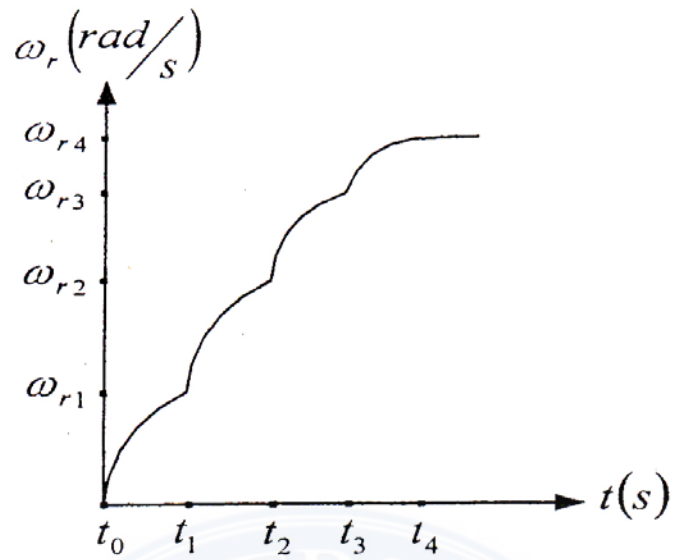
Persamaan 3.72 dan 3.58 diatas berlaku dengan mengabaikan induktansi jangkar. Dengan mengabaikan induktansi jangkar maka pergeseran waktu seperti

yang telah dijelaskan sebelumnya tidak akan terjadi. Gambar 3.17 di bawah ini memperlihatkan bahwa besar arus maksimum yang terjadi selama pengasutan pada saat t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , tidak mengalami perubahan, hal ini terjadi dengan mengabaikan induktansi jangkar.

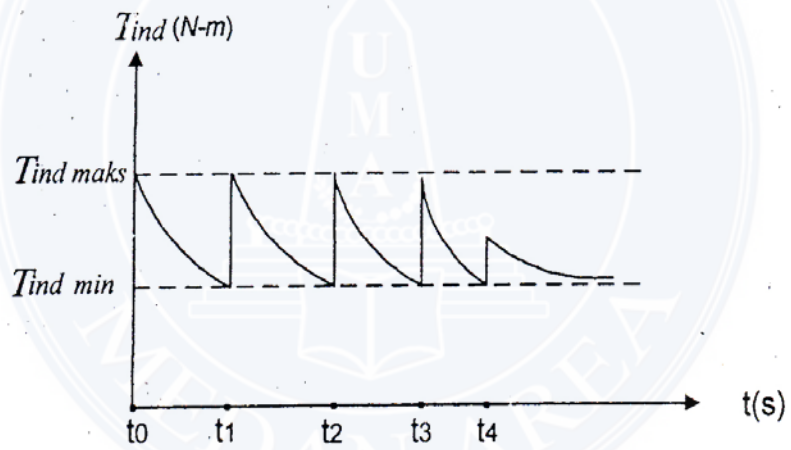


Gambar 3.17. Arus Start Motor tanpa Induktansi Jangkar selama Pengasutan

Pada Gambar 3.18 dan 3.19 memperlihatkan kecepatan putar motor dan torsi induksi yang terjadi dengan mengabaikan induktansi jangkar selama pengasutan .



Gambar 3.18. Kecepatan Putar Motor tanpa Induktansi Jangkar selama Pengasutan



Gambar 3.19. Torsi Induksi Motor tanpa Induktansi Jangkar selama Pengasutan