

ANALISIS PENGONTROL TEGANGAN TIGA FASA TERKENDALI PENUH DENGAN BEBAN RESISTIF INDUKTIF MENGGUNAKAN PROGRAM PSpice

Heber Charli Wibisono Lumban Batu, Syamsul Amien

Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA
e-mail: hebercharli@yahoo.co.id, samsul2@usu.ac.id

Abstrak

Sumber tegangan tiga fasa banyak digunakan di pabrik-pabrik, salah satunya adalah digunakan untuk mengoperasikan motor tiga fasa. Salah satu cara untuk mengatur tegangan *starting* motor tiga fasa adalah dengan menggunakan rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa. Rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa ini dapat disusun dari berbagai peralatan elektronika daya, salah satu jenis pengontrol tegangan tiga fasa yang sering digunakan yaitu pengontrol tegangan tiga fasa terkendali penuh. Tugas akhir ini dilakukan simulasi menggunakan program PSpice untuk mengamati cara kerja SCR yang disusun anti paralel dan tegangan keluaran SCR dalam suatu rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa terkendali penuh, dengan beban yang digunakan yaitu resistif (R) dan resistif induktif (RL). Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bentuk gelombang dan besarnya V_o rms tegangan keluaran pengontrol tegangan tiga fasa terkendali penuh. Dari hasil data simulasi dan perhitungan diperoleh, jika besarnya nilai sudut penyalan SCR di rubah $> 0^0$ maka besarnya nilai V_o rms beban R dan RL terhubung bintang $< (220 \text{ V})$ dan besarnya nilai V_o rms beban R dan RL terhubung delta $< (207,8 \text{ V})$. Besarnya V_o rms beban R dan RL baik terhubung bintang maupun delta juga dipengaruhi oleh tegangan masukan, sudut β , dan impedansi beban.

Kata Kunci: Pengontrol, SCR, PSpice, Beban RL

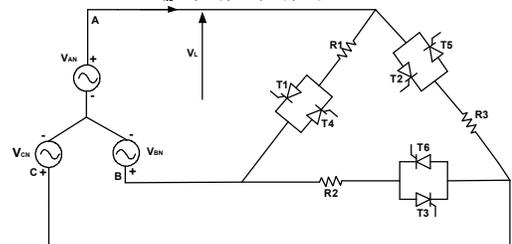
1. Pendahuluan

Sumber tegangan tiga fasa banyak digunakan di pabrik-pabrik, salah satunya adalah digunakan pada pengaturan *starting* motor tiga fasa. Salah satu cara untuk mengatur tegangan *starting* motor tiga fasa adalah dengan menggunakan rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa. Rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa ini dapat disusun dari berbagai peralatan elektronika daya. Pada tugas akhir ini penulis akan membahas salah satu jenis pengontrol tegangan tiga fasa yang sering digunakan yaitu pengontrol tegangan tiga fasa terkendali penuh. Rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa terkendali penuh ini menggunakan enam buah SCR yang disusun anti paralel. Beban yang digunakan dalam simulasi ini adalah beban resistif dan resistif induktif. Simulasi pada tugas akhir ini menggunakan program PSpice, hasil simulasi ini berupa bentuk gelombang tegangan output dari rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa terkendali penuh.

Tujuan dari penulisan ini adalah untuk menganalisa tegangan output, pengaruh perubahan sudut penyalan SCR, dan perubahan impedansi beban dari pengontrol tegangan tiga fasa terkendali penuh dengan beban resistif dan resistif induktif

2. Pengontrol Tegangan Tiga Fasa

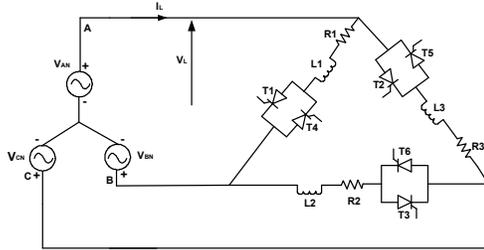
Diagram rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa terhubung delta dengan beban resistif (R) dan resistif induktif (RL) ditunjukkan pada Gambar 1. dan Gambar 2. Urutan firing dari SCR adalah $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$.



Gambar 1. Pengontrol tegangan tiga fasa beban R terhubung delta [1]

Untuk beban resistif, tegangan fasa keluaran rms dapat ditentukan dari [1]:

$$V_o = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} V_{ab}^2 d(\omega t) \right]^{1/2} = \sqrt{3} V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$



Gambar 2. Pengontrol tegangan tiga fasa beban RL terhubung delta [1]

Tegangan keluaran rms untuk beban RL terhubung delta dapat ditentukan sebagai berikut [1]:

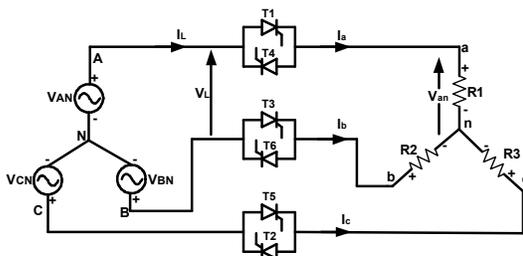
$$V_o = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} [2] = \sqrt{3} V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\beta - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

Sudut β dapat ditentukan dari persamaan berikut[2]:

$$\theta = \tan^{-1} (\omega L/R) \quad (3)$$

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) e^{(R/L)(\alpha - \beta)\omega} \quad (4)$$

Diagram rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa terhubung bintang dengan beban resistif (R) dan resistif induktif (RL) ditunjukkan pada Gambar 3. dan Gambar 4. Urutan firing dari SCR adalah $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$.



Gambar 3. Pengontrol tegangan tiga fasa beban R terhubung bintang [1]

Tegangan keluaran rms untuk beban R yang terhubung Bintang dapat ditentukan sebagai berikut [1]:

$$\text{Untuk } 0 \leq \alpha \leq 60^\circ$$

$$V_o = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{an}^2 d(\omega t) \right]^{1/2}$$

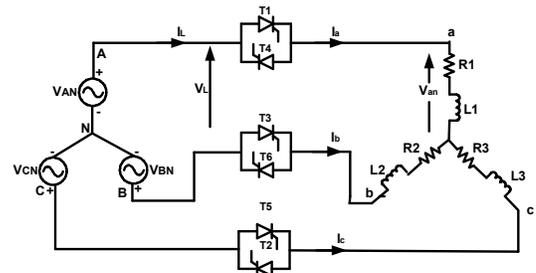
$$= \sqrt{6} V_s \left\{ \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right\}^{1/2} \quad (5)$$

Untuk sudut $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

$$V_o = \sqrt{6} V_s \left\{ \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{12} + \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right\}^{1/2} \quad (6)$$

Untuk sudut $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$

$$V_o = \sqrt{6} V_s \left\{ \frac{1}{\pi} \left(\frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right\}^{1/2} \quad (7)$$



Gambar 4. Rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa beban RL terhubung bintang [1]

Tegangan keluaran rms untuk beban RL terhubung Bintang dapat ditentukan sebagai berikut [1]:

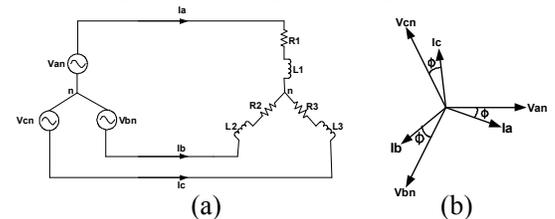
Untuk $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$

$$V_o = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} = \sqrt{6} V_s \left\{ \frac{1}{\beta} \left(\frac{\beta}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right\}^{1/2} \quad (8)$$

Untuk sudut $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$

$$V_o = \sqrt{6} V_s \left\{ \frac{1}{\beta} \left(\frac{4\beta}{26} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right\}^{1/2} \quad (9)$$

Hampir semua listrik yang digunakan oleh industri, dibangkitkan, ditransmisikan, dan di distribusikan dalam sistem tiga fasa. Sistem tiga fasa ini memiliki besar yang sama untuk arus dan tegangan tetapi mempunyai perbedaan sudut sebesar 120° antar fasanya. Sumbu ini disebut juga sumbu yang seimbang.



Gambar 5. (a) Rangkaian sistem tiga fasa urutan abc.

(b) Diagram fasor sebuah sistem seimbang [3]

Sistem pada Gambar 5b disebut sistem urutan abc, di mana fasa b tertinggal 120° terhadap fasa a, dan fasa c tertinggal 120° terhadap fasa b. Hanya satu kemungkinan urutan lagi selain urutan abc, yaitu urutan acb. Beban pada gambar 5a dihubungkan dengan cara hubungan bintang. Dalam hubungan tipe bintang ini tegangannya adalah tegangan fasa netral dan arus yang mengalir pada tiap fasa beban adalah arus fasa saluran. Daya yang digunakan pada masing-masing fasa pada beban adalah [3]:

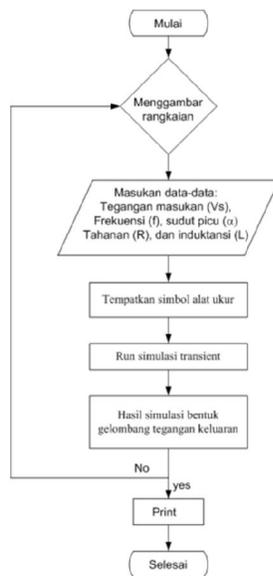
$$P_{1\phi} = |V_{L-N}| I_L \cos \phi \quad (10)$$

untuk sistem yang seimbang, daya totalnya adalah [3]:

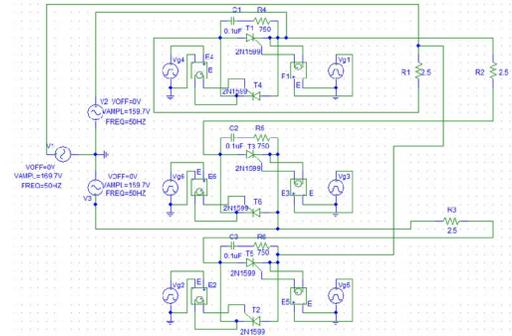
$$\begin{aligned} P_T = P_{3\phi} &= 3 |V_{L-N}| I_L \cos \phi \\ &= 3 \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} I_L \cos \phi \\ &= \sqrt{3} V_{L-L} I_L \cos \phi \end{aligned} \quad (11)$$

3. Simulasi Pengontrol Tegangan Tiga Fasa Terkendali Penuh

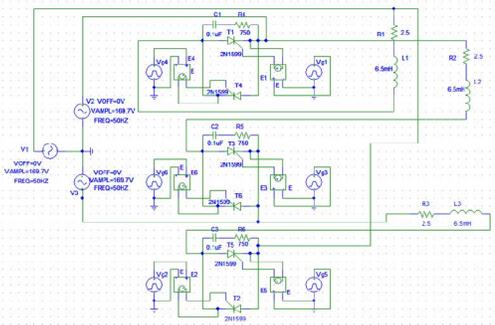
Langkah - langkah pemrograman dari simulasi penyearah jembatan terkontrol penuh dengan menggunakan program PSpice yang pertama adalah menentukan bentuk rangkaian penyearah jembatan terkontrol penuh dan menentukan node titik pada tiap komponen yang menyusunnya, kedua membuat listing program dengan memperhatikan gambar rangkaian yang dilengkapi dengan node yang telah dibuat pada algoritma, ketiga *run* simulasi gambar tegangan keluaran.



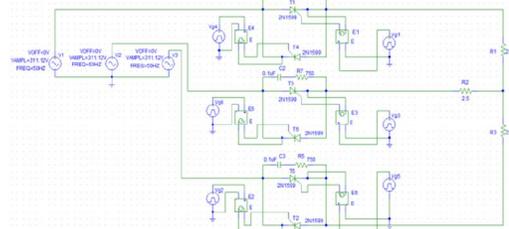
Gambar 6. Diagram alir simulasi tegangan keluaran pengontrol tegangan tiga fasa terkendali penuh



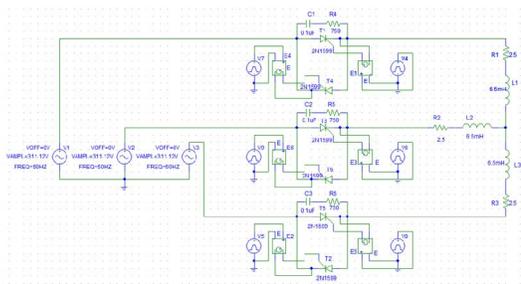
Gambar 7. Rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa beban R terhubung delta



Gambar 8. Rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa beban RL terhubung delta



Gambar 9. Rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa beban R terhubung bintang

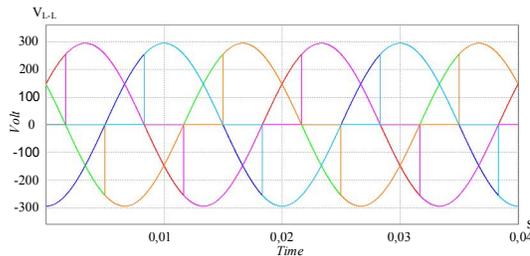


Gambar 10. Rangkaian pengontrol tegangan tiga fasa beban RL terhubung bintang

4. Analisa dan Pembahasan

Analisa dan pembahasan pengontrol tegangan tiga fasa beban R dan RL terhubung delta

- Tegangan Masukan (V_s) = 120 V
- Frekuensi = 50 Hz
- Sudut Picu (α) = 60°
- Beban R_1, R_2, R_3 = 2.5 ohm
- Beban L_1, L_2, L_3 = 6.5 mH



Gambar 11. Bentuk gelombang tegangan sumber V_{L-L} dan beban R terhubung delta

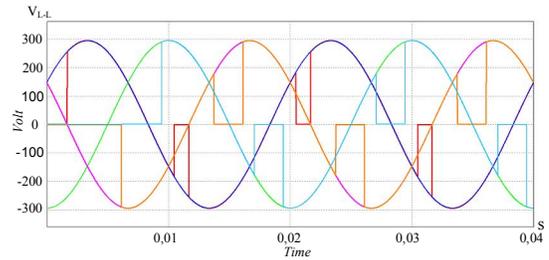
Analisa gelombang tegangan keluaran rangkaian beban R terhubung delta:

Pada Gambar 11 SCR₁ di triger pada sudut 60° arus mengalir dari V_A melalui R_1 , SCR₁, menuju V_B . SCR₂ di triger pada sudut 120° arus mengalir dari V_A melalui SCR₂, R_3 , menuju V_C . SCR₃ di triger pada sudut 180° arus mengalir dari V_B melalui R_2 , SCR₃, menuju V_C . SCR₄ di triger pada sudut 240° arus mengalir dari V_C melalui SCR₄, menuju V_A . SCR₅ di triger pada sudut 300° arus mengalir dari V_C melalui R_3 , SCR₅, menuju V_A . SCR₆ di triger pada sudut 360° arus mengalir dari V_C melalui SCR₆, R_2 , menuju V_B . Kemudian siklus berulang kembali dari SCR₁.

Perhitungan untuk tegangan rms beban R terhubung delta:

$$V_o = V_s \left\{ \frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right\}^{1/2}$$

$$= 169 \text{ V}$$



Gambar 12. Bentuk gelombang tegangan sumber V_{L-L} dan beban RL terhubung delta

Analisa gelombang tegangan keluaran rangkaian beban RL terhubung delta:

Pada Gambar 12 SCR₁ di triger pada sudut 60° arus mengalir dari V_A melalui R_1 , SCR₁, menuju V_B . SCR₂ di triger pada sudut 120° arus mengalir dari V_A melalui SCR₂, R_3 , menuju V_C . SCR₃ di triger pada sudut 180° arus mengalir dari V_B melalui R_2 , SCR₃, menuju V_C . SCR₄ di triger pada sudut 240° arus mengalir dari V_C melalui SCR₄, menuju V_A . SCR₅ di triger pada sudut 300° arus mengalir dari V_C melalui R_3 , SCR₅, menuju V_A . SCR₆ di triger pada sudut 360° arus mengalir dari V_C melalui SCR₆, R_2 , menuju V_B . Kemudian siklus berulang kembali dari SCR₁. Karena pengaruh induktansi pada rangkaian arus SCR₁, SCR₂, SCR₃, SCR₄, SCR₅, SCR₆ tidak akan jatuh menuju nol pada $\omega t = 180^\circ$, ketika tegangan masukan mulai menjadi negatif. SCR₁, SCR₂, SCR₃, SCR₄, SCR₅, SCR₆ akan terus terhubung sampai arus jatuh menjadi nol pada $\omega t = \beta$.

Perhitungan untuk tegangan rms beban RL terhubung delta:

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)(\alpha - \beta)/\omega}$$

$$\beta = 218,535^\circ$$

$$V_o = \sqrt{3} V_s \left\{ \frac{1}{\pi} \left(\beta - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \right\}^{1/2}$$

$$= 193,261 \text{ V}$$

Analisa dan pembahasan pengontrol tegangan tiga fasa beban R dan RL terhubung bintang

- Tegangan Masukan (V_s) = 220 V
- Frekuensi = 50 Hz
- Sudut Picu (α) = 60°
- Beban R_1, R_2, R_3 = 2,5 ohm
- Beban L_1, L_2, L_3 = 6.5 mH



Gambar 13. Bentuk gelombang tegangan sumber V_{L-N} dan beban R terhubung Bintang

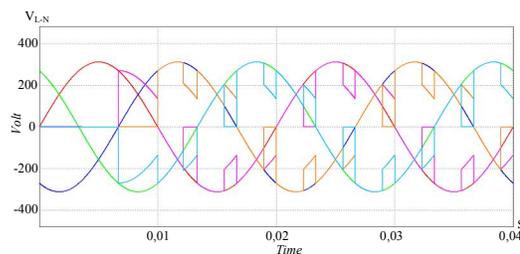
Analisa gelombang tegangan keluaran rangkaian beban R terhubung bintang:

Pada Gambar 13 dapat dilihat SCR_1 di triger pada sudut 60^0 dan SCR_6 masih konduksi kemudian arus mengalir dari V_A melalui SCR_1 , beban R_1 , beban R_3 , SCR_6 menuju V_B , SCR_1 masih konduksi dan SCR_2 di triger pada sudut 120^0 kemudian arus mengalir dari V_A melalui SCR_1 , beban R_1 , beban R_2 menuju V_C . SCR_3 di triger pada sudut 180^0 dan SCR_2 masih konduksi sehingga arus mengalir dari V_B melalui SCR_3 , beban R_2 , beban R_3 menuju V_C , SCR_3 masih bekerja dan SCR_4 di triger pada sudut 240^0 sehingga arus mengalir dari V_B melalui SCR_3 , beban R_2 , beban R_1 , menuju V_A . SCR_5 di triger pada sudut 300^0 dan SCR_4 masih konduksi sehingga arus mengalir dari V_C melalui beban R_3 , beban R_1 , menuju V_A , SCR_6 di triger pada sudut 360^0 dan SCR_5 masih konduksi sehingga arus mengalir dari V_C melalui beban R_3 , beban R_2 , menuju V_B . Siklus berulang kembali.

Perhitungan untuk tegangan rms beban R terhubung bintang:

$$V_O = \sqrt{6}V_s \left\{ \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{12} + \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right\}^{1/2}$$

$$= 156,2V$$



Gambar 14. Bentuk gelombang tegangan sumber V_{L-N} dan beban RL terhubung bintang

Analisa gelombang tegangan keluaran rangkaian beban RL terhubung bintang:

Pada Gambar 14 dapat dilihat SCR_1 di triger pada sudut 60^0 dan SCR_6 masih konduksi kemudian arus mengalir dari V_A melalui SCR_1 , beban R_1 , beban R_3 , SCR_6 menuju V_B , SCR_1 masih konduksi dan SCR_2 di triger pada sudut 120^0 kemudian arus mengalir dari V_A melalui SCR_1 , beban R_1 , beban R_2 menuju V_C . Karena pengaruh induktansi pada rangkaian arus SCR_1 dan SCR_2 , tidak akan jatuh menuju nol pada $\omega t = 180^0$, ketika tegangan masukan mulai menjadi negatif. SCR_1 dan SCR_2 akan terus terhubung sampai arus jatuh menjadi nol pada $\omega t = \beta$.

Perhitungan untuk mencari sudut β :

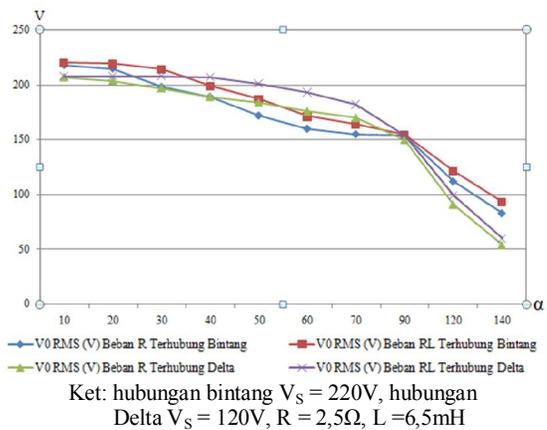
$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)(\alpha - \beta)/\omega}$$

$$\beta = 218,535^0$$

Perhitungan untuk tegangan rms beban RL terhubung bintang:

$$V_O = \sqrt{6}V_s \left\{ \frac{1}{\beta} \left(\frac{\beta}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right\}^{1/2}$$

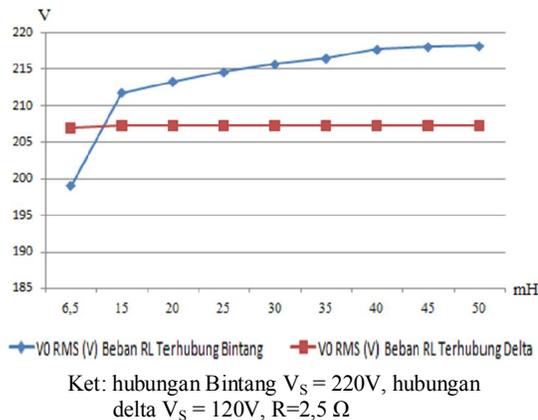
$$= 167 V$$



Gambar 15. Kurva besarnya tegangan keluaran dari berbagai variasi sudut penyalan SCR hasil simulasi PSpice

Pada Gambar 15 dapat dilihat besarnya nilai V_O rms beban R terhubung bintang maupun terhubung delta berbanding terbalik dengan sudut penyalan SCR, jika besarnya nilai sudut penyalan SCR di rubah $> 0^0$ maka besarnya nilai V_O rms beban R terhubung bintang maupun terhubung delta akan semakin kecil dari nilai tegangan masukan. Besarnya nilai V_O rms beban RL terhubung bintang untuk sudut penyalan

SCR $10^0 = 220V$ nilai yang sama dengan tegangan masukan, setelah sudut penyalan SCR $> 10^0$ maka besarnya V_O rms beban RL terhubung bintang $< 220V$. Begitu juga besarnya nilai V_O rms beban RL terhubung delta untuk sudut penyalan SCR 10^0 sampai $30^0 = 207,8V$ nilai yang sama dengan tegangan masukan, setelah sudut penyalan SCR $> 30^0$ maka besarnya V_O rms beban RL terhubung delta $< 207,8V$.



Gambar 16. Kurva besarnya tegangan keluaran dari berbagai variasi besarnya beban L dengan sudut penyalan 40^0 hasil simulasi PSpice

Pada Gambar 16 dapat dilihat besarnya nilai V_O rms beban RL terhubung bintang maupun terhubung delta berbanding lurus dengan besarnya nilai induktansi, semakin besar nilai induktansi maka besarnya nilai V_O rms beban RL terhubung bintang maupun terhubung delta akan semakin besar juga mendekati nilai tegangan masukan.

5. Kesimpulan

Setelah melakukan simulasi dan perhitungan, maka penulis dapat mengambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Bentuk gelombang tegangan keluaran dari pengontrol tegangan tiga fasa terkendali penuh dipengaruhi oleh besarnya tegangan masukan, sudut penyalan SCR, dan impedansi beban.
2. Pada beban RL, pengontrolan efektif dapat dilakukan pada sudut penyalan $> \beta$.
3. Semakin besar nilai L pada rangkaian beban RL untuk sudut penyalan tertentu, maka tegangan keluaran pengontrol

tegangan tiga fasa akan semakin besar mendekati nilai tegangan sumber.

4. Perubahan sudut penyalan akan mempengaruhi tegangan keluaran dari SCR, semakin besar sudut penyalan maka akan semakin kecil tegangan keluaran SCR.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada J. Lumban Batu dan L. br Sinambela selaku orang tua penulis, Ir. Syamsul Amien, M.Si selaku dosen pembimbing, juga Yulianta Siregar, S.T.,M.T, dan Ir. Riswan Dinzi, M.T 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]. Rashid, Muhammad H., *Power Electronic Circuit, Device and Application Second Edition*, Prentice-Hall International Inc, 1993.
- [2]. Rashid, Muhammad H., *Power Electronic handbook*, academic press, 1993.
- [3]. Stevenson, William D. & Grainger, John J., *"Power System Analysis"*, Mc Graw Hill Inc, 1994. [2]. Rashid, Muhammad H., *Power Electronics Handbook*, Academic Press, 2001.