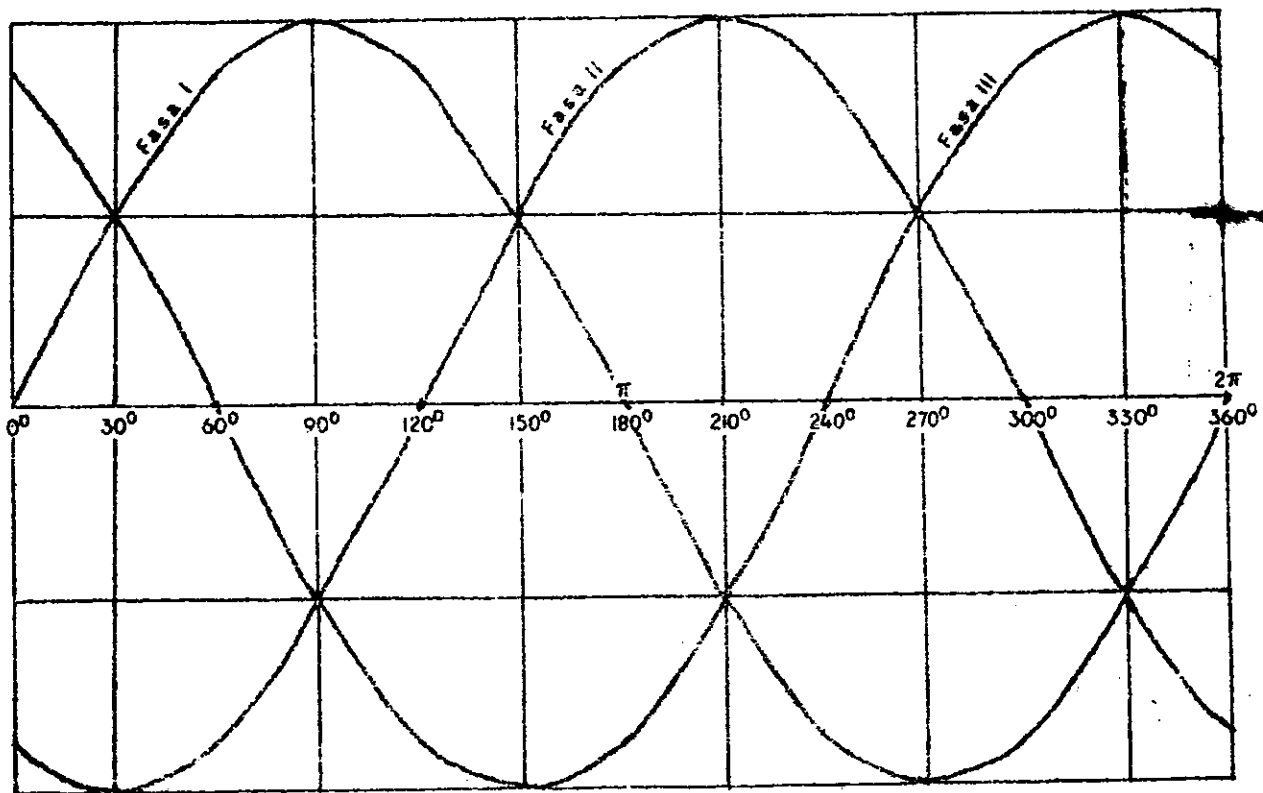


471/HD/86

Drs. Daman Suswanto dan Drs. Nurkausar D

Analisa Hubungan Bintang Rangkaian Tiga Fasa



Diterbitkan oleh:
UPT. PUSAT MEDIA PENDIDIKAN FPTK IKIP PADANG
Kampus IKIP Air Tawar Padang
1986

KATA PENGANTAR

Seperti kita ketahui buku-buku teknik yang khusus membahas tentang Analisa Rangkaian Listrik Tiga Fasa sedikit sekali, biasanya hanya dalam satu bab saja dalam suatu buku Teknik Listrik. Oleh sebab itu dalam usaha membantu mahasiswa dalam mempelajari dan menganalisa rangkaian listrik tiga fasa secara mendetail dalam satu buku, penulis berusaha untuk dapat menyumbangkan suatu karangan berbentuk buku Analisa Hubungan Bintang Rangkaian Tiga Fasa.

Buku Analisa Hubungan Bintang Rangkaian Tiga Fasa ini, terdiri dari dua bagian yaitu pertama Analisa Hubungan Bintang dan yang kedua Analisa Hubungan Segitiga. Hal ini sengaja penulis bagi dua agar analisa rangkaian listrik tiga fasa benar-benar dapat terfokuskan dalam satu buku sehingga dapat dipahami oleh mahasiswa tingkat II dan tingkat III Jurusan Pendidikan Teknik Elektro FPTK IKIP Padang secara lebih luas pembahasannya. Kalau dalam buku-buku lain pembahasan tentang analisa rangkaian tiga fasa ini tidak mendetail, maka dalam buku ini penulis merangkum seluruh masalah yang terjadi dalam rangkaian tiga fasa untuk dapat diketahui oleh mahasiswa. Dari pengalaman penulis menghadapi mahasiswa, banyak pertanyaan-pertanyaan yang diajukan oleh mahasiswa yang tidak ada dalam buku. Untuk itu maka penulis berusaha sedikit menyumbangkan buku ini untuk dapat membantu mahasiswa dalam belajar.

Dalam buku ini mungkin masih banyak kekurangan-kekurangan yang terjadi. Oleh sebab itu saran-saran dari segala pihak kami harapkan untuk dapat menyempurnakan buku ini. Akhirnya semoga buku ini dapat bermanfaat bagi semua pihak terutama mahasiswa Jurusan Pendidikan Teknik Elektro FPTK IKIP Padang dalam mengikuti program belajar.

Padang, Maret 1986

SAMBUTAN KETUA JURUSAN

Sungguh suatu yang sangat menggembirakan bagi kita apabila semua dosen dapat menghasilkan suatu karya tulis tidak hanya satu dua buku pelajaran yang sesuai dengan bidang studi. Selain dapat membantu mahasiswa di dalam belajar, juga merupakan suatu sarana bagi dosen untuk dapat mengembangkan kreativitas yang dapat memenuhi fasilitas sumber belajar yang ada pada Jurusan Pendidikan Teknik Elektro khususnya, maupun FPTK IKIP Padang pada umumnya. Yang kesemuanya merupakan suatu langkah untuk dapat tercapainya proses pendidikan yang dilaksanakan di IKIP Padang ini.

Dengan adanya buku ini mudah-mudahan dapat dimanfaatkan oleh mahasiswa dalam membantu memenuhi kebutuhan belajarnya, serta dapat meringankan bagi staf pengajar lainnya dalam melaksanakan proses belajar mengajar. Kami yakin dengan adanya buku-buku pelajaran yang menunjang proses belajar mengajar akan dapat ditingkatkan kualitas pendidikan di Indonesia ini. Dan ini merupakan titik kelemahan kita dewasa ini. Untuk itu, agar dapat menghilangkan kesenjangan yang ada dalam meningkatkan pendidikan dewasa ini, usaha untuk memenuhi kebutuhan sumber belajar mahasiswa merupakan usaha yang perlu mendapatkan penghargaan. Untuk itu kami selaku Ketua Jurusan Pendidikan Teknik Elektro, mengucapkan penghargaan kepada Drs. Daman Suswanto atas usaha yang telah dilakukannya ini. Semoga hal ini merupakan hal ini merupakan langkah maju dan dapat ditingkatkan terus untuk kemajuan dan perkembangan pendidikan di Jurusan Pendidikan Teknik Elektro khususnya dan FPTK IKIP Padang pada umumnya.

Padang, Maret 1986

Ketua Jurusan

Drs. Amran Gambut
NIP. 130.692.557

DAFTAR ISI

BAB	HALAMAN
KATA PENGANTAR	ii
SAMBUTAN KETUA JURUSAN	iii
DAFTAR ISI	iv
I. SISTEM LISTRIK TIGA FASA	1
A. Pendahuluan	1
B. Pembangkit Listrik Tiga Fasa	3
C. Terbangkitnya Tegangan Tiga Fasa	9
D. Beban Listrik Tiga Fasa	16
II. KONSEP HUBUNGAN BINTANG	21
A. Pendahuluan	21
B. Tegangan Tiga Fasa Pada Hubungan Bintang	24
C. Arus Tiga Fasa Pada Hubungan Bintang	29
D. Daya dan Faktor Daya Dalam Hubungan Bintang	34
III. ANALISA HUBUNG BINTANG	41
A. Analisa Beban Seimbang	41
B. Analisa Beban Tak Seimbang	53
C. Analisa Arus Pada Kawat Netral	61
D. Menentukan Urutan Fasa	66

DAFTAR BACAAN

LAMPIRAN

MILIK PERPUSTAKAAN IKIP PADANG	
INTELMATRI	23-11-1986
SUMBER BARSA	Harah
KOLEKSI	U iv
NO INVENTARIS	471/HR/86-a ₂ (2)
KLASIFIKASI	621.381 Sus a ₂

Bab I

Sistem Listrik Tiga Fasa

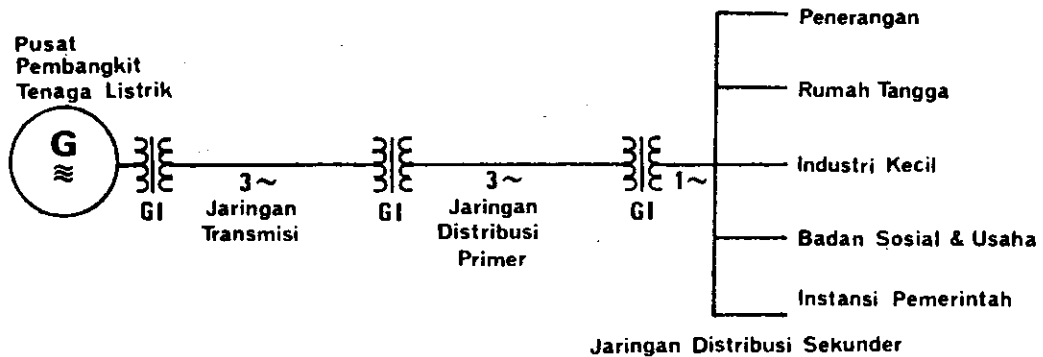
A. PENDAHULUAN

Seperti telah kita ketahui bahwa sistem listrik itu ada tiga macam, yaitu sistem satu fasa, sistem dua fasa, dan sistem tiga fasa. Dari ketiga sistem listrik tersebut, yang banyak digunakan dewasa ini adalah sistem satu fasa dan sistem tiga fasa. Hal ini disebabkan karena penggunaan kedua sistem ini sangat menguntungkan satu dengan yang lain. Apalagi untuk peralatan-peralatan listrik dewasa ini banyak di produksi untuk penggunaan kedua sistem tersebut.

Untuk sistem dua fasa saat ini jarang digunakan untuk suatu keperluan listrik, selain alasan kurang efisien juga kurang menguntungkan. Lagipula apabila sistem dua fasa ini sangat dibutuhkan, dapat dilakukan dengan cara menggunakan transformator pengubah tegangan bolak balik tiga fasa menjadi dua fasa.

Pada sistem satu fasa umumnya banyak digunakan oleh para konsumen pada jaringan distribusi sekunder, terutama untuk keperluan penerangan, rumah tangga, industri kecil, instansi pemerintah, badan-badan sosial maupun badan-badan usaha. Sedangkan untuk sistem tiga fasa

biasanya banyak digunakan untuk pembangkit tenaga listrik, jaringan transmisi, jaringan distribusi primer, dan penggunaan daya listrik yang besar bagi industri-industri besar. Untuk lebih jelasnya dapat kita lihat pada gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1.

Penggunaan sistem satu fasa dan tiga fasa di dalam sistem penyaluran tenaga listrik.

Dari gambar diatas dapat kita lihat bahwa sistem tiga fasa banyak digunakan untuk sistem pembangkitan , jaringan transmisi, dan jaringan distribusi primer. Karena pada sistem ini berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik bagi para konsumen di pusat-pusat beban pada jaringan distribusi sekunder, diperlukan suatu sistem yang dapat diandalkan kontinuitas penyaluran tenaga, juga memenuhi persyaratan secara teknis dan ekonomis sebagai suatu sistem. Sedangkan untuk sistem satu fasa banyak digunakan pada jaringan distribusi sekunder. Hal ini karena jaringan distribusi sekunder merupakan suatu jaringan atau instalasi langsung yang digunakan oleh

para konsumen di pusat-pusat beban, yang merupakan sistem listrik yang lebih aman bagi para konsumen dan lebih merata di dalam penggunaan tenaga listrik.

Secara teoritis sistem tiga fasa ini mempunyai kelebihan bila dibandingkan dengan sistem satu fasa. Kelebihan sistem tiga fasa ini adalah karena,

- a. daya listrik yang disalurkan dapat lebih besar,
- b. nilai sesaatnya (instantaneous value) lebih konstan,
- c. medan magnet putarnya mudah diadakan,
- d. lebih efisien dan ekonomis,
- e. apabila beban dalam keadaan seimbang, maka tenaganya selalu konstan,
- f. menggunakan material yang lebih sedikit untuk kapasitas alat yang sama, dan
- g. mempunyai kemampuan tiga kali lebih besar dari sistem satu fasa.

B. PEMBANGKIT LISTRIK TIGA FASA

Sistem pembangkitan tenaga listrik dapat dilakukan dengan menggunakan suatu alat yang disebut generator listrik. Generator ini berfungsi sebagai suatu alat yang dapat mengubah sumber energi mekanis yang berasal luar menjadi sumber tenaga listrik. Sumber energi mekanis ini berasal dari sebuah turbin maupun dari sebuah motor listrik. Untuk pembangkit tenaga listrik dengan kapasitas yang besar biasanya digunakan turbin sebagai tenaga penggerakannya. Sedang untuk pembangkit tenaga lis

trik dengan kapasitas kecil dapat digunakan motor listrik sebagai tenaga penggerak.

Menurut konstruksinya generator arus bolak balik tiga fasa dapat dibedakan dalam dua jenis, yaitu :

- a. Generator AC dengan kutub dalam
- b. Generator AC dengan kutub luar.

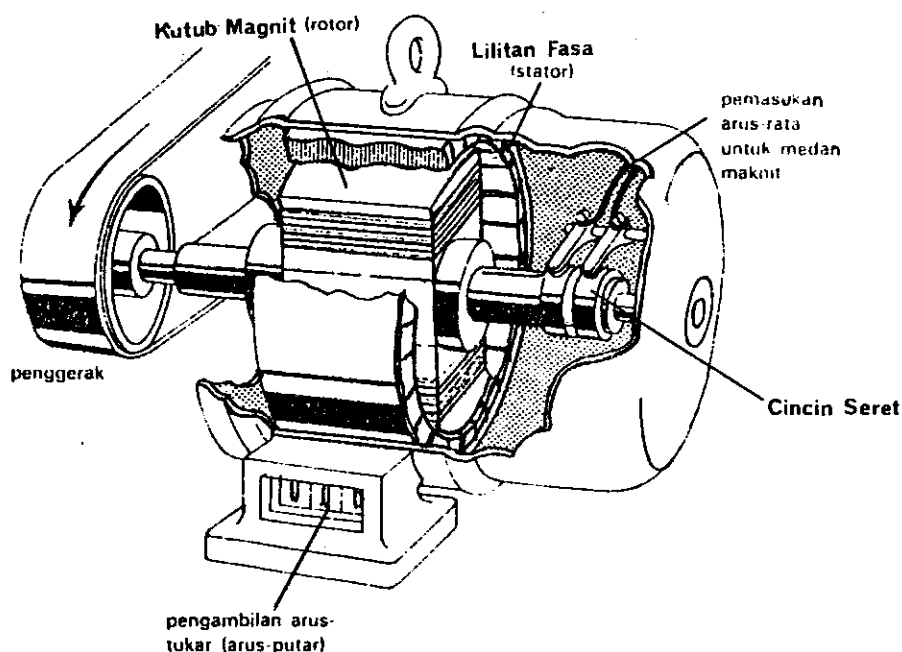
Generator kutub dalam apabila kutub-kutub magnetnya merupakan bagian yang berputar, terletak pada bagian dalam generator tersebut. Sedangkan lilitan kawat tempat terbentuknya tegangan bolak balik tiga fasa terletak pada bagian luar dan merupakan bagian yang tetap (stator). Kutub-kutub magnet inilah yang digerakkan oleh tenaga penggerak dari luar.

Sedangkan generator kutub luar apabila kutub-kutub magnet merupakan bagian yang tetap (stator) yang terletak pada bagian luar, dan lilitan kawat tempat terbentuknya tegangan bolak balik tiga fasa terletak pada bagian dalam, yang merupakan bagian yang bergerak (rotor).

Pada umumnya dari kedua jenis generator ini, generator kutub dalam yang umum dipakai untuk pembangkit listrik tiga fasa. Karena generator kutub dalam dapat menghasilkan tegangan yang besar, lagi pula dalam segi pengamanan generator kutub dalam ini lebih baik dari pada generator kutub luar. Hal ini disebabkan karena untuk generator kutub dalam, tegangan bolak balik yang dibangkitkan dalam lilitan kawat dapat langsung diambil

dari lilitan stator (bagian yang diam) tanpa lagi menggunakan cincin seret, seperti halnya pada generator kutub luar. Sebab jika hal ini terjadi dengan tegangan yg besar, maka pada cincin seret itu akan timbul percikan bunga api yang besar.

Pada gambar 2 di bawah ini diperlihatkan suatu generator dengan kutub dalam untuk tegangan yang besar. Dimana lilitan stator tempat terbentuknya tegangan bolak balik terletak pada bagian yang diam, sedangkan untuk lilitan kutub magnet terletak pada bagian yang bergerak (rotor).

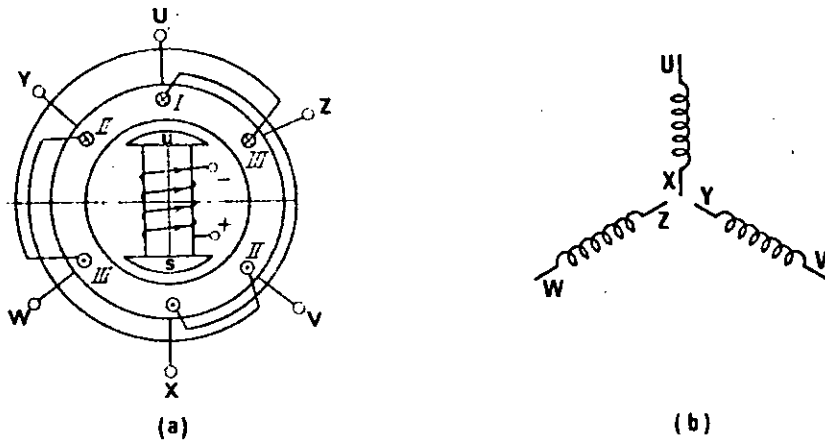


Gambar 2
Generator tiga fasa dengan kutub dalam

Cincin seret yang terdapat pada generator kutub dalam tersebut digunakan untuk memasukkan sumber arus searah bagi lilitan penguat magnet pada kutub. Sumber a-

rus searah digunakan pada lilitan penguat magnet agar distribusi medan magnet pada rotor dapat lebih homogen.

Untuk membangkitkan tegangan bolak balik tiga fasa, maka di dalam stator dari generator tersebut harus diadakan tiga buah lilitan yang di pasang sedemikian rupa sehingga tegangan-tegangan yang terbentuk di dalamnya akan mempunyai perbedaan fasa $1/3$ periode atau 120° listrik satu dengan yang lain.



Gambar 3.

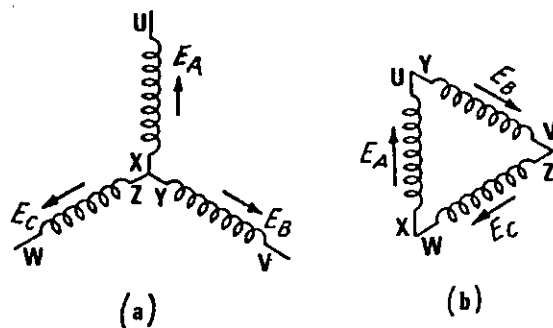
Konstruksi lilitan fasa generator tiga fasa dengan kutub dalam.

Ketiga lilitan pada stator tersebut masing-masing dinamakan dengan lilitan fasa. Dimana setiap ujung dan pangkal dari lilitan fasa tersebut biasanya diberi tanda dengan huruf U - X untuk lilitan fasa pertama. Sedangkan pada lilitan fasa kedua diberi tanda dengan huruf V - Y. Begitu juga untuk lilitan fasa ketiga diberi tanda dengan huruf W - Z, seperti terlukis dalam gambar 3.a dan 3.b diatas. Sehingga pada generator tiga fasa tersebut, a-

kan terdapat enam buah ujung lilitan fasa yang dapat dihubungkan satu dengan yang lain membentuk suatu hubungan tertentu.

Ketiga lilitan fasa tersebut dapat saling dihubungkan atau dikopel satu dengan yang lain. Cara menghubungkannya dapat digunakan dengan dua sistem, yaitu :

- a. Cara pertama, jika ketiga ujung lilitan fasa tersebut dihubungkan menjadi satu, yaitu ujung X, Y, dan Z, maka hubungan ini disebut hubungan bintang (dengan tanda Y). Dan ketiga tegangan bolak balik tiga fasa E_A , E_B , dan E_C akan terdapat pada ujung-ujung lilitan fasa U, V, dan W (lihat gambar 4.a dibawah ini).



Gambar 4.

Bentuk hubungan pada lilitan fasa.

- b. Cara kedua, jika ujung akhir dari lilitan fasa 1 dihubungkan dengan ujung mula dari lilitan fasa 2, yaitu ujung akhir U dengan ujung mula Y, dan ujung akhir dari lilitan fasa 2 dihubungkan dengan ujung mula dari lilitan fasa 3, yaitu ujung akhir V dengan ujung mula Z, serta jika ujung akhir dari lilitan fasa 3 dihubungkan

kan dengan ujung mula dari lilitan fasa 1, yaitu u -
jung akhir W dengan ujung mula X ; maka hubungan yg
serupa ini disebut dengan hubungan segitiga (dengan
tanda Δ).Lihat gambar 4.b diatas.

Dari ketiga ujung lilitan hubungan segitiga terse-
but akan terbangkitkan tegangan bolak balik tiga fasa
 $E_A, E_B,$ dan E_C .Tegangan tersebut merupakan tegangan antar
lilitan fasa, baik pada hubungan bintang maupun untuk hu-
bungan segitiga.

Untuk lebih mudahnya dewasa ini notasi pada ujung-
ujung lilitan fasa pada hubungan bintang maupun hubung-
an segitiga ini diberi notasi R untuk ujung UY hubungan
segitiga dan ujung U untuk hubungan bintang. Dan ujung V
untuk hubungan bintang dan ujung VZ untuk hubungan segi
tiga diberi notasi S, begitu juga untuk ujung W dari hu-
bungan bintang dan ujung WX untuk hubungan segitiga di-
beri notasi T. Sehingga ketiga ujung lilitan fasa terse-
but akan bernotasi R, S, dan T.

Untuk standar internasional ketiga ujung dari fasa
1 diberi notasi R (red), dan untuk fasa 2 diberi notasi
Y (yellow), serta untuk fasa 3 diberi notasi B (blue), se-
suai dengan warna dari kawat penghubung pada bagian lu-
ar dari generator tiga fasa tersebut.

Setiap ujung lilitan dari generator tiga fasa me-
nyediakan tegangan dan juga tenaga listrik bolak balik
yang berbeda fasa 120° listrik satu dengan yang lain. A-
pabila terdapat hanya tiga terminal (R, S, dan T), maka a-

kan ada tiga jenis tegangan yang terdapat pada ujung terminal tersebut, yaitu tegangan E_A , E_B , dan E_C yang disebut tegangan antar kawat (line to line).

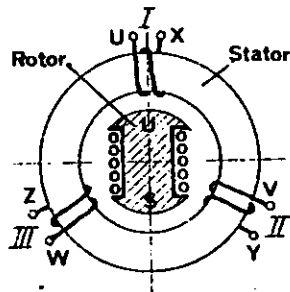
Sebaliknya bila pada hubungan bintang (Y) dibuat terminal keempat pada ujung-ujung lilitan XYZ (lihat gambar 4.a) yang disebut dengan netral, maka antara lilitan fasa dengan titik netral tersebut akan terdapat tegangan yang disebut dengan tegangan fasa terhadap netral (line to neutral).

Dari kedua hubungan tersebut, generator dalam sistem hubungan bintang (Y) lebih banyak dipakai, terutama untuk pembangkit tenaga listrik yang berkapasitas besar. Selain pertimbangan keamanan juga ujung netral dari terminal hubung bintang tersebut dapat dipakai sebagai sarana untuk pengamanan dari kerusakan yang timbul oleh adanya hubung singkat (short circuit) dengan tanah.

C. TERBANGKITNYA TEGANGAN TIGA FASA

Prinsip terbangkitnya tegangan bolak balik tiga fasa terjadi jika medan magnet dari suatu rotor dieksitasi atau diputar dengan kecepatan sudut konstan oleh sumber energi mekanis dari luar. Akibat Bergeraknya medan magnet homogen dari rotor tersebut, yang akan mempengaruhi lilitan fasa sesuai dengan Hukum Faraday, maka pada lilitan fasa akan terjadi proses induksi elektromagnetis didalamnya, yang kemudian pada lilitan fasa tersebut akan terbangkit tegangan bolak balik yang berbentuk sinus.

Karena lilitan fasa satu dengan yang lain dibedakan letaknya sebesar sudut 120° listrik maka tegangan yang terinduksi dalam lilitan fasa akan berbeda fasa sebesar sudut 120° listrik juga.



Gambar 5.

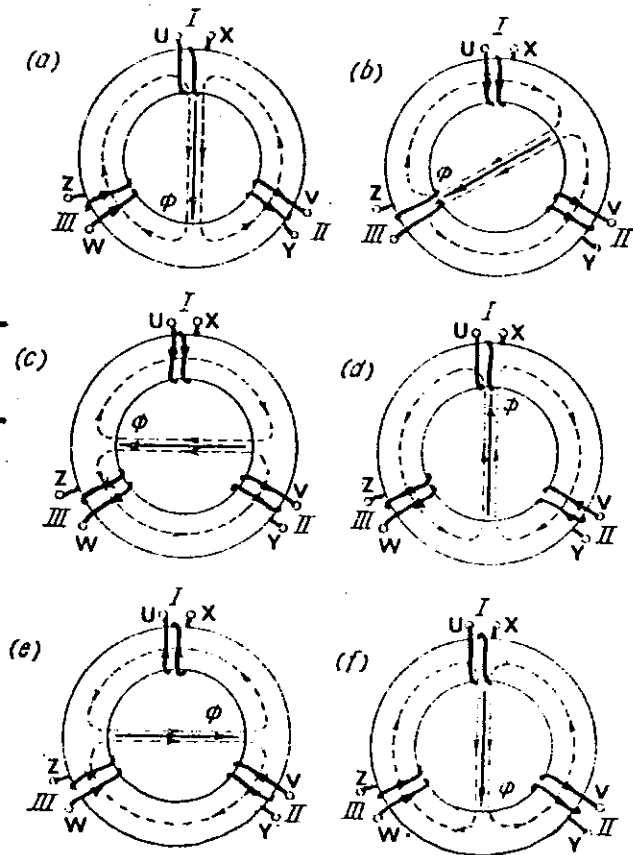
Penampang generator AC dengan dua kutub magnet

Pada gambar 5 diatas ini diperlihatkan suatu penampang dari generator tiga fasa dengan kutub dalam yang mempunyai dua buah kutub magnet. Dimana pada stator dililitkan tiga lilitan fasa yang diletakkan 120° listrik satu sama lainnya.

Apabila dua buah kutub magnet diputar oleh sumber energi mekanis dari luar dengan kecepatan konstan, maka medan magnet homogen yang terbangkit pada kutub tersebut akan mempengaruhi lilitan fasa secara bergantian. Dari posisi kedudukan dari medan magnet putar yang mempengaruhi lilitan fasa, maka ketiga tegangan yang dihasilkan akan bergantian mencapai harga maksimum positif maupun harga maksimum negatif.

Seperti kita ketahui bahwa kutub magnet akan menghasilkan medan magnet homogen dari kutub selatan ke kutub utara. Distribusi medan magnet ini akan mempengaruhi

inti besi dihadapannya, sehingga pada inti besi tersebut akan mengalir fluk magnet ke arah kiri dan kanan dari kutub magnet. Apabila kutub magnet diputar searah dengan jarum jam, maka tegangan yang dibangkitkan oleh lilitan fasa akan menjadi negatif apabila ditinggalkan atau yang berlawanan arah jarum jam, dan akan menjadi positif bila dihadapan dengan medan magnet putar atau yg searah dengan jarum jam. Akibat pengaruh medan magnet ini, yang berubah secara berkala maka akan terbentuk tegangan bolak balik tiga fasa. Untuk lebih jelasnya proses pembentukan tegangan bolak balik tiga fasa dapat kita lihat pada gambar 6. a sampai gambar 6. f dibawah ini.

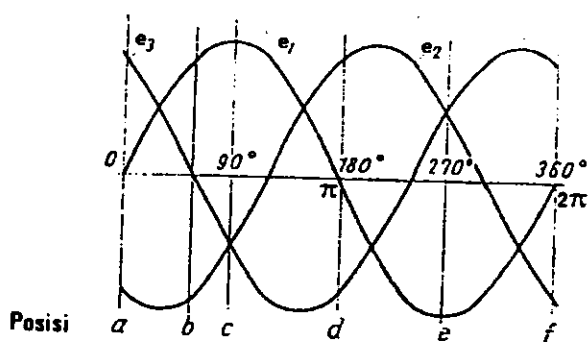


Gambar 6.

Beberapa posisi kedudukan medan magnet putar dalam mempengaruhi lilitan fasa.

Seperti kita ketahui bahwa arah medan magnet dapat mempengaruhi ggl yang terbangkit dalam lilitan fasa, dengan arah yang berlawanan dan membentuk sudut 90° , satu sama lainnya (Hukum tangan kanan atau kaidah putaran sekrup). Dengan demikian arah medan magnet yang melintasi teras akan mempengaruhi arah tegangan yang terbangkit dalam lilitan fasa, seperti pada gambar 6 diatas. Dimana arah resultante medan magnet diperlihatkan oleh vektor Φ .

Pada gambar 6.a, arah medan magnet membelakangi lilitan fasa I, sehingga pada saat itu lilitan fasa I tidak terbangkitkan tegangan, sedangkan untuk lilitan fasa II dibangkitkan tegangan dalam arah negatif, dan untuk lilitan fasa III terbangkit tegangan dalam arah positif. Hal tersebut sesuai dengan arah medan magnet yang terdapat pada teras tersebut. Karena posisi resultante medan magnet Φ berada diantara lilitan fasa II dan lilitan fasa III, maka tegangan yang dibangkitkan pada lilitan fasa tersebut akan mencapai harga yang tidak begitu maksimum. Untuk jelasnya dapat kita lihat pada gambar 7 dibawah ini dalam kedudukan 0° atau dalam posisi a.



Gambar 7.

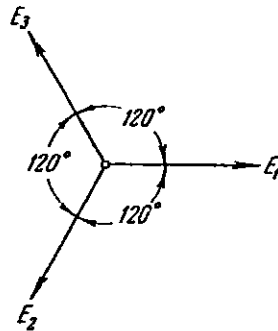
Bentuk gelombang sinusoida untuk tegangan arus bolak balik tiga fasa.

Dalam gambar 6.b posisi resultante medan magnet tepat pada lilitan fasa III. Pada posisi b gambar 7 tegangan e_3 yang dibangkitkan pada lilitan fasa III akan menjadi nol, sedangkan untuk tegangan e_1 dari lilitan fasa I mencapai harga positif dan tegangan e_2 mencapai harga negatif. Kedua tegangan e_1 dan e_2 tidak mencapai harga maksimum, karena arah resultante medan magnet Φ berada diantara lilitan fasa I dan II.

Harga maksimum dari tegangan e_1 akan mencapai ke posisi puncak apabila kedudukan resultante medan magnet Φ pada kedudukan seperti pada gambar 6.c. Dimana pengaruh medan magnet putar yang searah dengan arah jarum jam hanya mempengaruhi lilitan fasa I saja, sedangkan untuk tegangan e_2 dan e_3 mempunyai harga yang sama pada arah negatif yang sama-sama dipengaruhi oleh medan magnet yang arahnya berlawanan dengan arah jarum jam. Tegangan e_1 ini mencapai harga puncak maksimum pada $\frac{1}{4}$ periode atau pada kedudukan 90° seperti pada gambar 7 diatas.

Begitu seterusnya untuk kedudukan resultante medan magnet Φ seperti pada gambar 6.d, 6.e, dan 6.f, sehingga akan membentuk suatu gelombang sinusoida tegangan tiga fasa seperti tergambar pada gambar 7 dalam satu periode atau 360° .

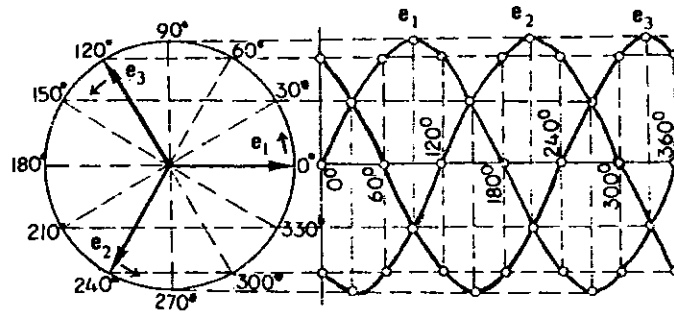
Secara vektor bentuk perbedaan fasa tegangan e_1 , e_2 , dan e_3 dapat kita lihat pada gambar 8 dibawah ini.



Gambar 8.

Bentuk vektor tegangan tiga fasa

Dalam gambar 8 diatas setiap tegangan bolak balik tiga fasa mempunyai perbedaan fasa masing-masing 120° listrik satu sama lainnya, atau saling menggeser satu dengan yang lain sebesar 120° listrik. Apabila vektor diagram tegangan ini kita buat didalam perputaran dengan sudut putar 360° maka bentuk tegangan bolak balik



Gambar 9.

Bentuk gelombang tegangan tiga fasa secara grafis.

tiga fasa dapat kita lukis dalam bentuk grafis seperti pada gambar 9 diatas. Bentuk ini kita lukis dalam sudut sudut yang tertentu, sehingga terdapat ketiga tegangan fasa tersebut.

Secara matematik harga sesaat dari tegangan bolak balik tiga fasa ini dapat kita nyatakan dalam bentuk persamaan,

$$e_1 = E_m \sin \omega t \quad (1)$$

$$e_2 = E_m \sin (\omega t - 120^\circ) \quad (2)$$

$$e_3 = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) \quad (3)$$

atau dapat pula dituliskan dengan :

$$e_R = E_m \sin \omega t$$

$$e_S = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (4)$$

$$e_T = E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (5)$$

Jumlah ketiga tegangan fasa ini pada setiap saat selalu sama dengan nol, dan secara matematis dapat kita buktikan sebagai berikut.

Apabila ketiga tegangan fasa dari persamaan (1), (2), dan (3) kita jumlahkan akan didapat :

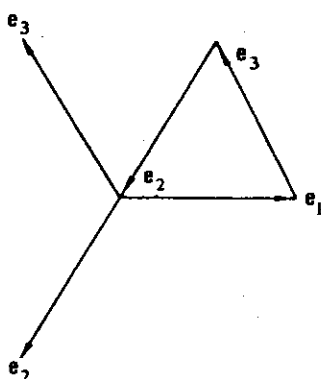
$$\begin{aligned} e_1 + e_2 + e_3 &= E_m \left\{ \sin \omega t + \sin (\omega t - 120^\circ) + \right. \\ &\quad \left. \sin (\omega t - 240^\circ) \right\} \\ &= E_m \left\{ \sin \omega t + \sin \omega t \cdot \cos 120^\circ - \cos \right. \\ &\quad \left. \omega t \cdot \sin 120^\circ + \sin \omega t \cdot \cos 240^\circ \right. \\ &\quad \left. - \cos \omega t \cdot \sin 240^\circ \right\} \end{aligned}$$

Oleh karena $\sin 120^\circ = +\frac{1}{2}\sqrt{3}$, dan $\sin 240^\circ = -\frac{1}{2}\sqrt{3}$, serta $\cos 120^\circ = -\frac{1}{2}$, begitu juga $\cos 240^\circ = -\frac{1}{2}$.

$$\begin{aligned} \text{Maka, } e_1 + e_2 + e_3 &= E_m \left\{ \sin \omega t - \frac{1}{2} \cdot \sin \omega t - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \right. \\ &\quad \left. \omega t - \frac{1}{2} \cdot \sin \omega t + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \cos \omega t \right\} \\ &= E_m \cdot (0) \end{aligned}$$

Dengan demikian maka $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ (6)

Dengan menggunakan penjumlahan secara vektor dapat juga dibuktikan bahwa jumlah tegangan dari ketiga fasa itu adalah nol. Coba perhatikan gambar 10 dibawah ini.



Gambar 10.

Penjumlahan tegangan tiga fasa secara vektor

Karena jumlah dari ketiga tegangan fasa ini sama dengan nol, maka dalam hubungan segitiga dari ketiga fasa tersebut tidak akan merupakan hubung singkat.

D. BEBAN LISTRIK TIGA FASA

Beban untuk listrik tiga fasa pada dasarnya dapat merupakan suatu beban tiga fasa yang utuh, yaitu berupa motor-motor listrik tiga fasa yang mempunyai impedansi setiap lilitan satu dengan yang lain sama. Tetapi dapat juga merupakan suatu kumpulan dari tiga buah beban listrik satu fasa yang mempunyai karakteristik beban yang

tidak sama satu dengan yang lain ,misalnya instalasi penerangan untuk perumahan. Ini disebabkan beban listrik untuk instalasi penerangan pada perumahan tidak saja untuk penerangan saja tetapi untuk keperluan lainnya. Walaupun beban penerangan untuk perumahan ini merupakan instalasi satu fasa, tetapi secara keseluruhan beban listrik tersebut merupakan beban tiga fasa pada pembangkitannya.

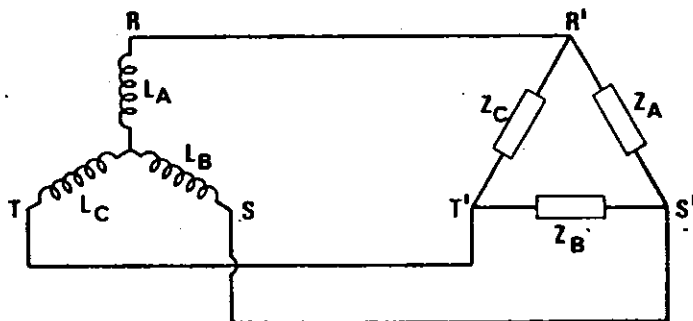
Rangkaian beban ini mempunyai dua kemungkinan hubungan dan dua kemungkinan keadaan beban itu sendiri. Kemungkinan pertama rangkaian beban itu bisa berbentuk hubungan bintang (Y) atau berbentuk hubungan segitiga (Δ). Kemungkinan kedua yaitu keadaan beban itu sendiri, bisa berupa beban seimbang atau berupa beban tak seimbang. Dikatakan seimbang jika setiap fasa dari tiap-tiap kawat saluran mempunyai besar dan impedansi yang sama sifatnya. Yaitu berupa beban resistif atau beban induktif atau beban kapasitif atau ketiga-tiganya dengan besarnya sama untuk setiap fasanya. Sedangkan untuk beban tak seimbang apabila masing-masing fasa, nilainya sama tetapi berbeda sifatnya atau sebaliknya nilainya berbeda tetapi sifatnya sama atau kedua-duanya berbeda baik untuk nilai maupun sifatnya.

Dari penjelasan diatas, maka menurut struktur atau cara menghubungkan dari beban listrik tiga fasa ini, maka beban listrik tiga fasa ini dapat dibagi dalam enam jenis beban, yang dihubungkan secara :

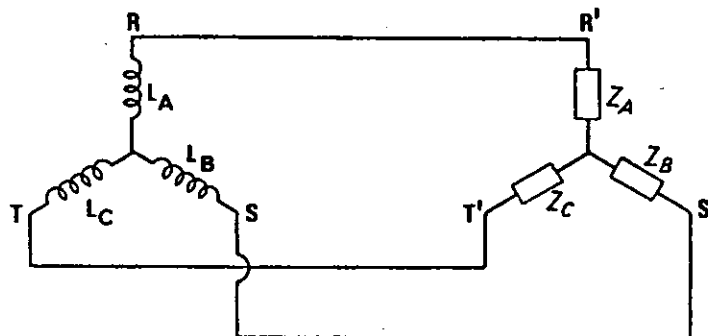
621.581
Sus
a2

1. Beban seimbang dalam hubungan bintang dengan tiga kawat saluran.
2. Beban tidak seimbang dalam hubungan bintang dengan tiga kawat saluran.
3. Beban seimbang dalam hubungan bintang dengan empat kawat saluran.
4. Beban tak seimbang dalam hubungan bintang dengan empat kawat saluran.
5. Beban seimbang dalam hubungan segitiga.
6. Beban tak seimbang dalam hubungan segitiga.

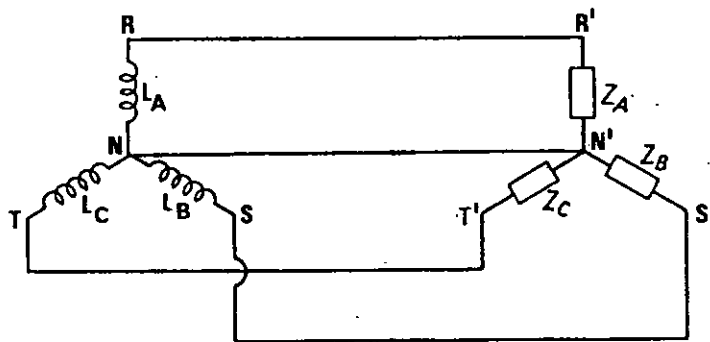
Untuk lebih jelasnya mengenai gambaran beban listrik tiga fasa ini dapat kita lihat pada gambar 11 dibawah ini.



Gambar 11.a



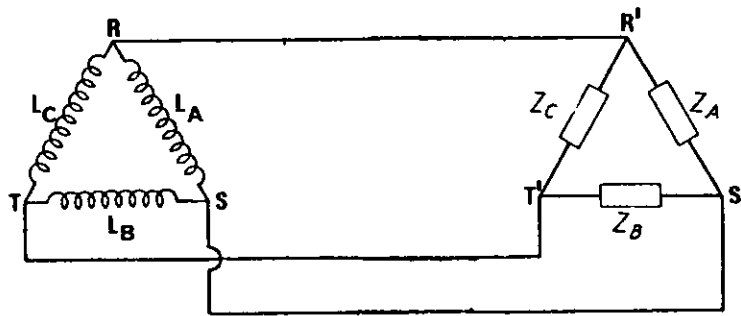
Gambar 11.b



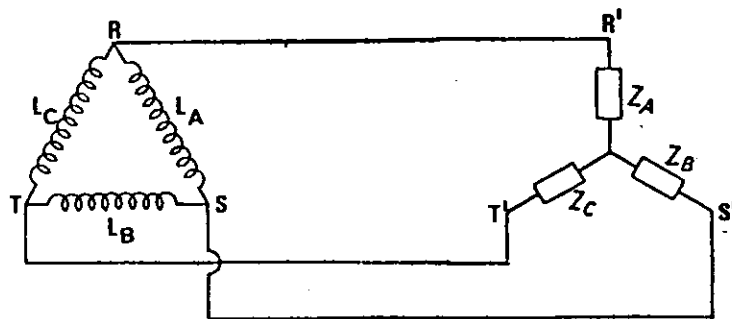
Gambar 11.c

- a. Beban hubungan segitiga (Δ).
- b. Beban hubungan bintang (Y) 3 kawat.
- c. Beban hubungan bintang (Y) 4 kawat.

Pada gambar 11 di atas diperlihatkan tiga buah hubungan dimana lilitan fasa pada generator tiga fasa di hubungkan secara bintang (Y). Lilitan fasa pada generator tiga fasa ini jika di hubungkan secara bintang maka pada beban listrik tiga fasa dapat dilakukan tiga buah hubungan, yaitu pertama dalam hubungan segitiga (Gbr. 11. a), kedua dalam hubungan bintang tanpa kawat netral (Gbr 11. b), dan ketiga dalam hubungan bintang dengan kawat netral (Gbr. 11. c). Lain halnya apabila pada generator tiga fasa dimana lilitan fasa di hubungkan secara segitiga, hanya ada dua hubungan yang dapat dibentuk pada beban listriknya, yaitu hubungan segitiga dan hubungan bintang. Karena titik netral pada lilitan fasa tidak bisa diadakan pada generator tersebut. Perhatikan gambar 12 dibawah ini, dimana lilitan fasa dari generator tiga fasa di hubungkan secara segitiga.



Gambar 12.a



Gambar 12.b

- a. Rangkaian tiga fasa hubungan $\Delta - \Delta$.
- b. Rangkaian tiga fasa hubungan $\Delta - Y$.

Lebih jelasnya mengenai analisa beban listrik tiga fasa ini, dapat kita ikuti pada penjelasan bab-bab selanjut - nya.

Bab II

KONSEP HUBUNGAN BINTANG

A. PENDAHULUAN

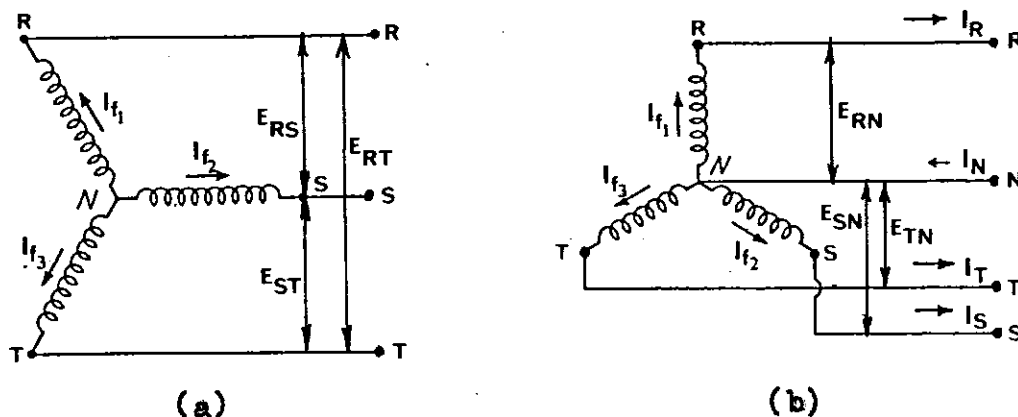
Seperti yang telah diterangkan pada bab I, bahwa dalam rangkaian tiga fasa apabila ketiga lilitan fasa disatukan ujung-ujungnya, maka dari hubungan tersebut akan membentuk suatu hubungan bintang (Y). Dalam hubungan bintang ini ketiga lilitan fasa dibuat sedemikian rupa sehingga masing-masing lilitan berbeda fasa sebesar 120° listrik.

Pada umumnya generator tiga fasa, ujung-ujung awal dan ujung-ujung akhir dari lilitan fasa dihubungkan secara bintang (Y) atau segitiga (Δ). Sistem demikian lebih praktis dari pada apabila keenam ujung lilitan fasa dikeluarkan di luar generator.

Untuk hubungan bintang ini terdapat dua cara, yaitu jika kawat lilitan fasa yang keluar dari generator tiga buah, maka hubungan bintang tersebut dinamakan sistem hubungan bintang tiga kawat. Jika yang keluar empat kawat lilitan fasa maka sistem hubungan tersebut dinamakan hubungan bintang empat kawat, dimana salah satu kawat terdapat kawat netral yang dihubungkan dengan titik pertemuan ujung-ujung yang disatukan tadi.

Pada gambar 13 di bawah ini diperlihatkan hubungan bintang tiga kawat (Gbr. 13.a), dan hubungan bintang dengan empat kawat (Gbr. 13.b). Dimana pada hubungan bintang dengan kawat netral tersebut atau sistem tiga fasa dengan empat kawat, terdapat dua tegangan yang tidak sama besar, yaitu :

1. tegangan antara kawat fasa dengan kawat netral, disebut dengan tegangan fasa,
2. tegangan antara kawat fasa dengan kawat fasa, disebut dengan tegangan line (saluran).



Gambar 13.

- a. Hubungan bintang dengan 3 kawat
- b. Hubungan bintang dengan 4 kawat

Dalam gambar 13.b diatas, tegangan fasa adalah E_{RN} , E_{SN} , dan E_{TN} , sedang untuk tegangan line adalah E_{RS} , E_{ST} , dan E_{TR} . Pada hubungan bintang dengan 3 kawat hanya terdapat tegangan line saja, dimana tegangan fasa dalam hal ini tidak dihubungkan.

Apabila diperhatikan, maka sistem tiga fasa dengan 4 kawat ini mempunyai keuntungan bila dibandingkan dengan sistem tiga fasa dengan 3 kawat pada hubungan bin-

tang, yaitu :

1. pada sistem tiga fasa 4 kawat bisa diperoleh 2 macam harga tegangan, yaitu tegangan fasa atau tegangan line dengan netral (E_{LN}), dan tegangan line (line to line) E_{LL} ,
2. kemampuan sistem tiga fasa 4 kawat diperbesar 3 kali sistem tiga fasa 3 kawat,
3. regulasi tegangan (voltage regulation) menjadi lebih baik. Definisi regulasi tegangan bisa dirumuskan sebagai :

$$E_R = \frac{E_{NL} - E_{FL}}{E_{FL}} \times 100 \% \quad (7)$$

dimana : E_R = tegangan regulasi

E_{NL} = tegangan tanpa beban (no load)

E_{FL} = tegangan berbeban penuh (full - load).

Hubungan bintang ini banyak digunakan untuk generator-generator pembangkit tenaga listrik, motor, transformator tiga fasa, sedangkan untuk hubung segitiga jarang digunakan untuk hubungan pada lilitan fasa generator-generator tiga fasa. Untuk keperluan jaringan atau instalasi penerangan, banyak digunakan sistem tiga fasa 4 kawat. Karena dengan sistem tersebut lampu-lampu penerangan dapat dihubungkan langsung antara kawat saluran (line) dengan kawat netral. Pada umumnya untuk sistem 3 fasa 4 kawat ini titik netralnya diketanahkan (grounded neutral system), agar pada saat terjadi gangguan arus kilat dapat direduksi langsung ke bumi.

B. TEGANGAN TIGA FASA PADA HUBUNGAN BINTANG

Seperti dijelaskan diatas bahwa pada hubungan bintang ini mempunyai dua buah tegangan, yaitu tegangan fasa dan tegangan saluran (line). Dimana dari gambar 13 dapat kita lihat bahwa tegangan fasa merupakan tegangan lilitan fasa, karena tegangan antara kawat fasa dengan kawat netral merupakan tegangan yang dibangkitkan dalam lilitan fasa. Oleh sebab itu besarnya tegangan fasa ini dapat kita nyatakan seperti persamaan (1), (2), dan (3), yaitu :

$$E_{RN} = E_m \sin \omega t \quad (8)$$

$$E_{SN} = E_m \sin (\omega t - 120^\circ) \quad (9)$$

$$E_{TN} = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) \quad (10)$$

Sedangkan untuk tegangan saluran tidaklah demikian kenyataannya. Apabila kita perhatikan gambar 13 diatas, kenyataan menunjukkan bahwa beda tegangan antara dua titik (misalnya R dan S), adalah sama dengan tegangan pada titik R (E_{RN}) dikurangi dengan tegangan pada titik S yaitu E_{SN} . Maka dengan demikian, hubungan antara tegangan saluran dengan tegangan fasa dapat kita nyatakan sebagai berikut,

$$E_{RS} = E_{RN} - E_{SN} \quad (11)$$

$$E_{ST} = E_{SN} - E_{TN} \quad (12)$$

$$E_{TR} = E_{TN} - E_{RN} \quad (13)$$

Karena tegangan fasa sama dengan tegangan pada lilitan fasa maka sudut perbedaan fasa antara ketiga tegangan fasa adalah 120° listrik satu dengan yang lain. Apabila tegangan fasa E_{RN} kita buat sebagai vektor pangkal, maka menurut aljabar fasor harga-harga tegangan fasa adalah :

$$E_{RN} = E_m \angle 0^\circ = E_m + j.0 \quad (14)$$

$$E_{SN} = E_m \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} E_m + j 0.866 E_m \quad (15)$$

$$E_{TN} = E_m \angle -120^\circ = -\frac{1}{2} E_m - j 0.866 E_m \quad (16)$$

Dari persamaan (14), (15), dan (16) tersebut apabila kita substitusikan ke persamaan (11), (12), dan (13) maka akan diperoleh :

$$\begin{aligned} E_{RS} &= E_{RN} - E_{SN} \\ &= (E_m + j.0) + (\frac{1}{2} E_m - j 0.866 E_m) \\ &= 1\frac{1}{2} E_m + j 0.866 E_m \\ &= E_m (1\frac{1}{2} + j 0.866) \end{aligned}$$

$$\text{maka } E_{RS} = E_m \cdot 1.732 \angle 30^\circ = \sqrt{3} \cdot E_m \angle 30^\circ \quad (17)$$

$$\begin{aligned} E_{ST} &= E_{SN} - E_{TN} \\ &= (-\frac{1}{2} E_m + j 0.866 E_m) - (-\frac{1}{2} E_m - j 0.866 E_m) \\ &= 0 - j 0.866 E_m \\ &= 1.732 E_m \angle -90^\circ \end{aligned}$$

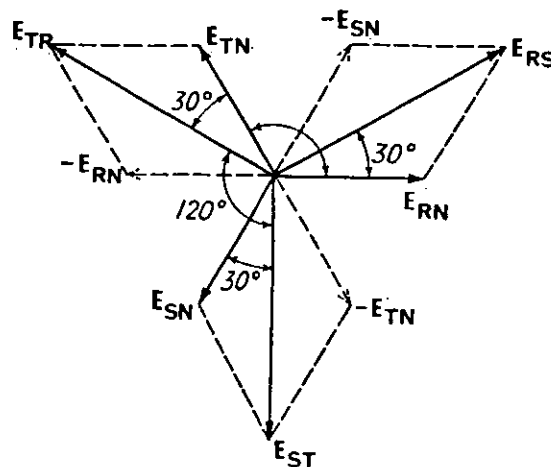
$$\text{atau } E_{ST} = \sqrt{3} E_m \angle -90^\circ \quad (18)$$

$$E_{TR} = E_{TN} - E_{RN}$$

$$\begin{aligned}
 E_{TR} &= (-\frac{1}{2} E_m - j 0.866 E_m) - (E_m + j 0) \\
 &= -1\frac{1}{2} E_m - j 0.866 E_m \\
 &= 1.732 E_m \angle 150^\circ
 \end{aligned}$$

atau $E_{TR} = \sqrt{3} E_m \angle 150^\circ$ (19)

Dari persamaan (17), (18), dan (19) dapat diketahui bahwa tegangan saluran (line) tersebut satu dengan yang lain berbeda fasa 120° listrik, dan berbeda fasa 30° listrik terhadap tegangan fasa masing-masing. Untuk lebih jelasnya dapat kita lihat pada vektor diagram pada gambar 14 dibawah ini.



Gambar 14.

Vektor diagram tegangan hubungan bintang (Y)

Pada vektor diagram diatas apabila kita perhatikan maka tegangan saluran E_{RS} mempunyai sudut perbedaan fasa 30° listrik terhadap tegangan fasa E_{RN} sebagai vektor pangkalnya. Dan tegangan saluran E_{ST} mempunyai sudut fasa 90° listrik dalam arah negatif terhadap vektor pangkal E_{RN} , begitu juga untuk tegangan saluran E_{TR} mem-