

BAB II

GANGGUAN DAN PENGAMAN PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Rele pengaman sistem tenaga listrik adalah peralatan listrik yang dirancang untuk mengkoordinasikan beroperasinya rele pengaman untuk meningkatkan keandalan sistem penyaluran tenaga listrik dengan dasar pemisahan bagian yang mengalami gangguan agar tidak berpengaruh pada bagian yang bekerja normal.

2.1. Gangguan – Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik

Sumber gangguan pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh dua faktor yaitu dari dalam sistem dan dari luar sistem. Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain:

1. Terjadinya kenaikan nilai tegangan dan arus yang sangat besar, sehingga menghasilkan panas yang berlebih pada komponen dalam sistem tenaga listrik.
2. Terjadinya hubung singkat dan muncul sebagai busur listrik didalam aliran udara. Sehingga menyebabkan temperatur yang sangat tinggi pada busur listrik yang akan melelehkan materi apapun, dan menyebabkan kebakaran serta kerusakan.
3. Kesalahan pemasangan instalasi.
4. Kerusakan material seperti isolator pecah, kawat putus, atau kabel cacat isolasinya.
5. Kesalahan mekanis karena proses penuaan.

Sedangkan untuk gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain:

1. Gangguan-gangguan mekanis karena pekerjaan galian saluran lain. Gangguan ini terjadi untuk sistem kelistrikan bawah tanah.
2. Pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir. Pada gangguan surja petir dapat mengakibatkan gangguan tegangan lebih dan dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus isolasi peralatan (*breakdown*).

Pengaruh lingkungan seperti pohon, binatang dan benda-benda asing serta akibat kecerobohan manusia

Untuk gangguan yang bersifat sementara setelah arus gangguannya terputus misalnya karena terbukanya *circuit breaker* oleh rele pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali. Sedangkan pada gangguan permanen terjadi kerusakan yang bersifat permanen sehingga baru bisa dioperasikan kembali setelah bagian yang rusak diperbaiki atau diganti.

Pada saat terjadi gangguan akan mengalir arus yang sangat besar pada fasa yang terganggu menuju titik gangguan, dimana arus gangguan tersebut mempunyai harga yang jauh lebih besar dari rating arus maksimum yang diijinkan, sehingga terjadi kenaikan temperatur yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik yang digunakan.

2.2. Faktor penyebab Timbulnya Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Dalam sistem tenaga listrik tiga fasa, gangguan – gangguan arus lebih yang mungkin terjadi adalah sebagai berikut yaitu :

2.2.1. Gangguan beban lebih (overload)

Gangguan ini sebenarnya bukan gangguan murni, tetapi bila dibiarkan terus menerus berlangsung dapat merusak peralatan listrik yang dialiri arus tersebut. Pada saat gangguan ini terjadi arus yang mengalir melebihi dari kapasitas peralatan listrik dan pengaman yang terpasang.

2.2.2. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat terjadi dua fasa, tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, atau 3 fasa ke tanah. Gangguan hubung singkat ini sendiri dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu :gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Yang termasuk dalam rangkaian hubung singkat simetri yaitu gangguan hubung singkat tiga fasa , sedangkan gangguan yang lainnya merupakan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu.

Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetri. Gangguan tidak simetri ini terjadi sebagai akibat gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa, atau gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

Gangguan-gangguan tidak simetri akan menyebabkan mengalirnya arus tak seimbang dalam sistem sehingga untuk analisa gangguan digunakan metode komponen simetri. untuk menentukan arus maupun tegangan disemua bagian sistem setelah terjadi gangguan.

2.2.3. Gangguan Tegangan Lebih

Gangguan tegangan lebih diakibatkan karena adanya kelainan pada sistem. Gangguan tegangan lebih dapat terjadi antara lain karena :

- gangguan petir
- gangguan surja hubung, di antaranya adalah penutupan saluran tak serempak pada pemutus tiga fasa, penutupan kembali saluran dengan cepat, pelepasan beban akibat gangguan, penutupan saluran yang semula tidak masuk sistem menjadi masuk sistem, dan sebagainya

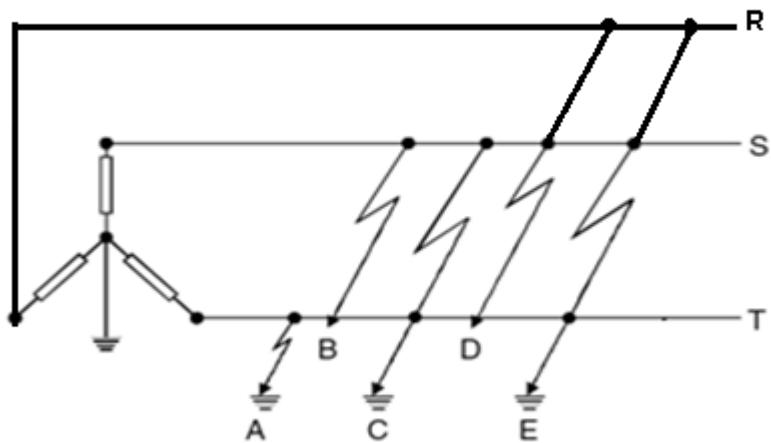
2.3. Gangguan Hubung Singkat pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan hubung singkat biasanya melewaskan arus yang sangat besar, menghasilkan panas yang berlebih pada komponen peralatan dalam sistem tenaga listrik disekitar titik gangguan. Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa gangguan hubung singkat dalam sistem tenaga dibagi menjadi dua macam yaitu: gangguan hubung singkat simetri dan asimetri.

Gangguan hubung singkat simetri terdiri dari gangguan hubung singkat tiga fasa (L-L-L) dan tiga fasa ke tanah (L-L-L-G). Gangguan hubung singkat tidak simetri terdiri dari gangguan hubung singkat satu fase ke tanah (L-G), dua fase ketanah (L-L-G) dan antar fase (L-L).

Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetri. Seperti disebutkan diatas, gangguan ini disebabkan oleh gangguan hubung singkat satu fase ketanah, dua fase ketanah dan gangguan antar fase. Gangguan-gangguan tidak simetri akan

menyebabkan mengalirnya arus tidak seimbang dalam sistem, sehingga untuk analisa gangguan digunakan metode komponen simetri. Hal ini digunakan untuk menentukan arus maupun tegangan disemua bagian sistem setelah terjadi gangguan.



(A) Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah; (B) Hubung Singkat Antar Fasa; (C) Hubung Singkat 2 Fasa ke Tanah; (D) Hubung Singkat 3 Fasa; (E) Hubung Singkat 3 Fasa ke Tanah.

Gambar 2.1 Macam-macam Gangguan Hubung Singkat

2.4. Analisa dan Perhitungan Gangguan Hubung Singkat

Dalam studi short circuit, semua perhitungan dianggap ideal (semua tegangan dianggap 1 pu). Kapasitansi charging dan beban statis tegangan diabaikan. Transformer taps dapat ditetapkan pada posisi baik nominal atau posisi tapnya, dan skema berbeda yang tersedia untuk sistem impedansi transformator yang benar dan jika off-nominal tersedia. Diasumsikan bahwa gangguan terjadi terbatas bus yang terkena gangguan dan resistansi short

circuit diabaikan. Sistem diasumsikan seimbang dan metode komponen simetris digunakan untuk gangguan yang tidak seimbang.

2.4.1. Arus Hubung singkat standar ANSI / IEEE

PowerStation menyediakan dua metode perhitungan arus hubung singkat berdasarkan ANSI / IEEE dan standar IEC. Pada PowerStation dapat dipilih metode perhitungan Short-Circuit Studi Kasus Editor. Bagian ini menjelaskan metode standar perhitungan ANSI / IEEE. Standar Kepatuhan perhitungan arus hubung singkat PowerStation per standar ANSI / IEEE sepenuhnya sesuai dengan dokumentasi ANSI / IEEE terbaru seperti tercantum di bawah ini.

Tabel 2.1 Standar perhitungan arus hubung singkat PowerStation per standar ANSI/IEEE.

Standar	Pub. Tahun	Judul
IEEE C37.04	1979	Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical
IEEE C37.010	1979-1999	Standard Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical
IEEE C37.13	1990	Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures
IEEE C37.013	1997	Standard for AC High-Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis

IEEE C37.20.1	1993 2002	Standard for Metal Enclosed Low-Voltage Power Circuit Breaker Switchgear
IEEE Std 141	1986, 1993, 2002	Electric Power Distribution for Industrial Plants – the Red Book
IEEE Std 242	1986 2001	IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems – the Buff Book

Standar-standar ini adalah untuk perhitungan arus hubung singkat dan peringkat peralatan dalam sistem tegangan ac dengan tegangan nominal hingga 240 kV dan beroperasi pada 50 Hz atau 60 Hz. Standar-standar perhitungan arus hubung singkat dan peringkat peralatan mencakup tiga fase, line-to-ground, line-to-line, dan line-to-line-to-ground.

Perhitungan praktis untuk menghitung besar arus hubung singkat dalam sistem dapat dilakukan sebagai berikut:

- a. Gangguan hubung singkat tiga phasa

- b. Gangguan hubung singkat phasa – phasa

$$Ihs_{2\phi} = \frac{\sqrt{3} V_f}{Z_1 + Z_2} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2)$$

Z_1 dan Z_2 masing-masing merupakan impedansi urutan positif dan negatif yang mempunyai besaran nilai yang sama, maka didapatkan :

Dimana : V_f adalah tegangan sebelum terjadi hubung singkat

c. Gangguan hubung singkat satu phasa - ketanah

$$I_1 \text{fasa} = \frac{3E_{\text{ph}}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots \quad (2.4)$$

Dimana : I = arus gangguan 1 fasa ketanah yang dicari

V = tegangan fasa-netral sistem 20 kV

Z₁= impedansi urutan positif yang diperoleh dari perhitungan di atas

Z_2 = impedansi urutan negatif yang diperoleh dari perhitungan di atas

Z_0 = impedansi urutan nol yang diperoleh dari perhitungan di atas

2.5. Rele Pengaman

Gangguan dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan. Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa dalam sistem tenaga listrik banyak sekali terjadi gangguan yang sesungguhnya merupakan peristiwa hubung singkat. Untuk melindungi peralatan terhadap gangguan yang terjadi dalam sistem diperlukan alat-alat pengaman. Alat-alat pengaman tersebut antara lain rele.

Rele ini mempunyai beberapa fungsi sebagai berikut:

1. Membunyikan alarm, menutup rangkaian trip dari pemutus rangkaian, untuk membebaskan peralatan dari gangguan yang terjadi.
 2. Membebaskan bagian yang bekerja tidak normal

3. Membebaskan dengan segera bagian yang terganggu
4. Melokalisir akibat dari gangguan
5. Memberikan petunjuk atas lokasi serta macam dari gangguan

2.5.1. Tipe Rele Pengaman

Pada dasarnya sistem pengaman arus lebih yang digunakan dalam sistem tenaga listrik tidak berdiri sendiri-sendiri, artinya dalam pengoperasiannya dibantu oleh rele lain. Untuk tujuan sistem pengamanan, rele dapat dibagi kedalam beberapa tipe sesuai dengan fungsinya antara lain:

a. Rele Arus Lebih (*Overcurrent Relay*)

Rele arus lebih adalah rele perlindungan yang bekerja bila arus yang mengalir pada saluran melebihi arus penyetelan rele arus lebih tersebut. Rele ini merupakan yang paling sederhana bila dibandingkan dengan rele-rele yang lain. Hanya satu variabel yang dibutuhkan untuk mengoperasikan rele ini lebih bekerja yaitu arus. Walaupun prinsipnya sederhana, rele ini mempunyai banyak karakteristik yang dapat dikembangkan hanya dengan variabel arus dan waktu.

b. Rele Arah (*Directional Relay*)

Rele arah bekerja bila arus gangguan mempunyai arah tertentu dan arah sebaliknya tidak bekerja. Apabila rele arah ini digabungkan sering dikatakan rele arus lebih terarah.

c. Rele Jarak (*Distance Relay*)

Rele jarak bekerja atas dasar perbandingan tegangan (V) dan arus (I) yang terukur pada lokasi dimana rele tersebut ditempatkan pada saat terjadi gangguan. Apabila V/I yang terukur lebih kecil dari V/I yang diamankan atau impedansi (Z) saluran yang diamankan maka rele bekerja. Sedangkan bila V/I yang terukur lebih besar dari impedansi saluran yang diamankan maka rele tidak bekerja.

d. Rele Gangguan Tanah (*Ground Fault Relay*)

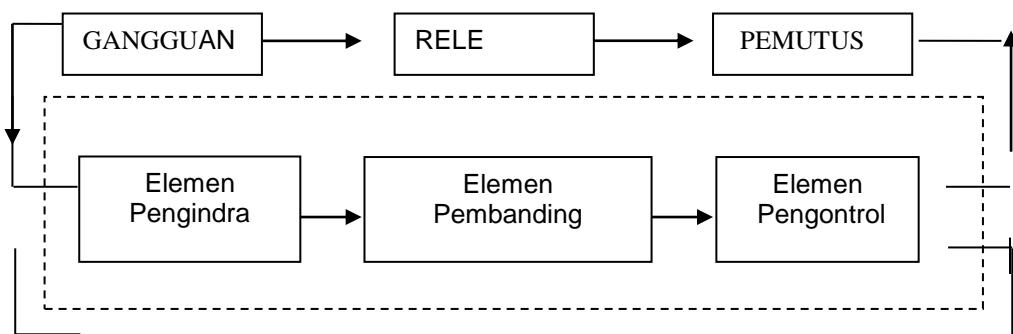
Rele gangguan ketanah bekerja bila terjadi gangguan hubung singkat ke tanah atau antara fasa dengan tanah.

e. Rele Turun Tegangan

Apabila terjadi gangguan pada saluran yang menyebabkan tegangan sistem turun dibawah harga penyetelan rele ini, maka rele bekerja.

2.5.2. Elemen Dasar Rele Pengaman

Rele pengaman biasanya dipisahkan menjadi tiga elemen dasar seperti terlihat pada Gambar 2.2 :



Gambar 2.2 Skema Konsep Kerja dan Elemen Dasar Rele Pengaman

a. Elemen Pengindera.

Elemen ini berfungsi untuk merasakan besaran-besaran listrik seperti arus, tegangan, frekuensi, dan sebagainya tergantung rele yang digunakan. Pada elemen ini besaran yang masuk akan dirasakan keadaannya apakah keadaan yang diproteksi mendapatkan gangguan atau dalam keadaan normal yang untuk selanjutnya besaran tersebut dikirimkan ke elemen pembanding. Komponen yang berfungsi sebagai elemen pengindera adalah transformator arus (CT).

b. Elemen Pembanding

Elemen ini berfungsi menerima besaran setelah terlebih dahulu besaran itu diterima oleh elemen pengindera untuk membandingkan besaran listrik pada saat keadaan normal dengan besaran yang *disetting* pada rele. Komponen yang berfungsi sebagai elemen pembanding ini adalah rele, yang bekerja setelah mendapatkan besaran dari elemen pengindera dan membandingkan dengan besar arus penyetelan dan kerja rele.

c. Elemen Kontrol

Elemen ini berfungsi untuk mengadakan perubahan secara cepat pada besaran ukurnya dan akan segera memberikan isyarat untuk membuka *circuit breaker* atau memberikan sinyal. Komponen yang berfungsi sebagai elemen kontrol adalah kumparan penjatuh (*tripping-coil*).

2.5.3. Syarat-syarat sistem Proteksi

Rele merupakan kunci kelangsungan kerja dari suatu sistem tenaga maka untuk menjamin keandalan sistem tenaga yang bersangkutan, dalam memilih suatu perlindungan yang sesuai dengan kepentingan dan keadaan daerah perlindungan, maka diperlukan pertimbangan-pertimbangan

kemampuan untuk melindungi suatu sistem tenaga, rele pengaman harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

a. Kecepatan Bereaksi

Kecepatan bereaksi rele adalah saat rele mulai merasakan adanya gangguan sampai dengan pelaksanaan pembukaan pemutus tenaga (*circuit breaker*).

b. Kepekaan Operasi (*Sensitivity*)

Kepekaan suatu sistem perlindungan dinyatakan dengan perbandingan antara arus gangguan minimum dengan arus minimum yang menyebabkan rele bekerja. Kemampuan rele pengaman untuk memberikan respon bila merasakan gangguan walaupun yang dikenakan pada sistem merupakan besaran yang kecil.

c. Selektif (*Selectivity*)

Kemampuan rele pengaman untuk menentukan titik dimana gangguan muncul dan memutuskan rangkaian dengan membuka CB terdekat. Rele harus mampu memisahkan bagian yang terkena gangguan dari bagian sistem lain sehingga pengaruh gangguan terhadap sistem secara keseluruhan dapat dikurangi sampai sekecil mungkin.

d. Keandalan (*Reliability*)

Keandalan rele dapat dihitung dari jumlah rele yang bekerja untuk mengamankan gangguan berbanding jumlah gangguan yang terjadi. Keandalan rele yang baik adalah 90-99 %. Semakin tinggi keandalan maka sistem tersebut semakin baik dan dapat meminimalkan terjadinya kerusakan yang disebabkan oleh gangguan.

e. Ekonomis

Penggunaan relé selain memenuhi syarat diatas juga harus disesuaikan dengan harga peralatan yang diamankan. Karena itu tidak semua peralatan harus dilengkapi dengan pengamanan yang lengkap karena harga peralatan pengaman juga harus diperhitungkan tanpa menghilangkan efektivitas penyaluran daya listrik. Sisi ekonomis perlu dipertimbangkan setelah aspek teknis telah terpenuhi untuk kelayakan operasi peralatan.

2.6 Komponen simetris

2.6.1 Sintesis Fasor Tak Simetris dari Komponen-Komponen Simetrisnya

Menurut teorema Fortescue, tiga fasor tak seimbang dari sistem tiga-fasa dapat diuraikan menjadi tiga sistem fasor yang seimbang. Himpunan seimbang komponen itu adalah:

1. Komponen urutan-positif(positive sequence components) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya.
2. Komponen urutan-negatif yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya.
3. Komponen urutan nol yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan penggeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain.

Jadi, urutan fasa komponen urutan positif dari fasor tak seimbang itu adalah abc, sedangkan urutan fasa dari komponen urutan negatif

adalah acb. Jika fasor aslinya adalah tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan V_a , V_b , dan V_c . Ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen urutan-positif, 2 untuk komponen urutan-negatif, dan 0 untuk komponen urutan nol. Komponen urutan positif dari V_a , V_b dan V_c adalah V_{a1} , V_{b1} , dan V_{c1} . Demikian pula, komponen urutan negatif adalah V_{a2} , V_{b2} , dan V_{c2} , sedangkan komponen urutan nol adalah V_{a0} , V_{b0} , dan V_{c0} .

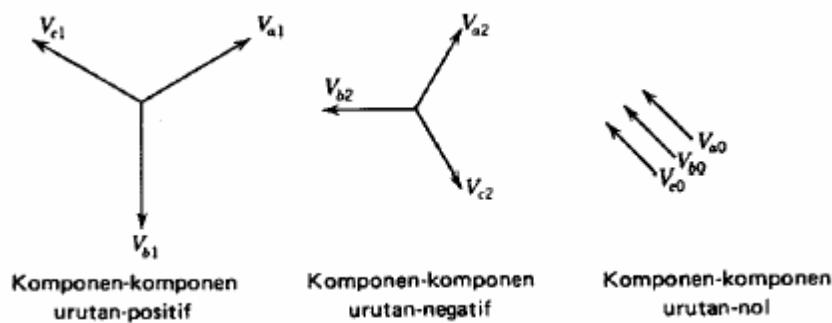
Karena setiap fasor takseimbang, yang asli adalah jumlah komponen, asorasi yang dinyatakan dalam suku-suku komponennya adalah

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (11.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (11.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (11.3)$$

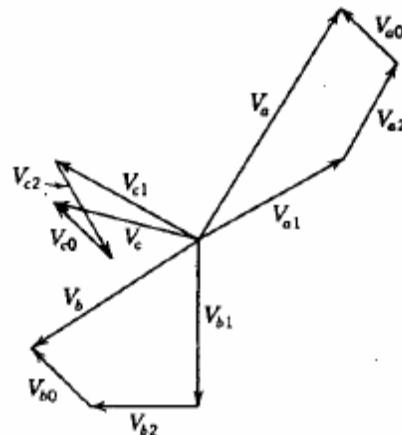
Sintesis komponen simetris



Gambar 2.3 Komponen urutan positif, negatif dan urutan nol

Dari gambar 2.3 dapat dilihat bahwa komponen urutan positif adalah 3 buah fasor yang mempunyai beda sudut $\pm 120^\circ$ antar fasa sama dengan magnitudes dari urutan positif (positive sequence). Komponen urutan negatifnya adalah 3 buah fasor yang mempunyai beda sudut $\pm 120^\circ$ antar fasa sama dengan magnitudes dari urutan negatif (negative sequence).

Komponen urutan nol adalah 3 buah fasor yang arah bersamaan dengan magnitudes urutan nol (zero sequence).



Gambar2.4. Penjumlahan secara grafis komponen-komponen pada Gambar 2.3 untuk mendapatkan tiga fasor tak seimbang

Bermacam-macam keuntungan dari analisis sistem Daya dengan metoda komponen simetris akan berangsur-angsur menjadi jelas bila kita menerapkan metoda ini untuk menelaah gangguan tak simetris pada sistem yang lepas dari gangguan tersebut adalah simetris. Cukup untuk kita sebutkandi sini bahwa metoda itu terdiri dari mendapatkan komponen simetris arus pada gangguan. Kemudian nilai arus dan tegangan pada berbagai titik dalam sistem dapat diperoleh. Metoda yang cukup sederhana ini dapat memberikan ramalan yang seksama tentang perilaku system itu.

Karena adanya pergeseran fasa pada komponen simetris tegangan dan arus dalam sistem tiga-fasa, akan sangat memudahkan bila kita mempunyai metoda penulisan cepat untuk menunjukkan perputaran fasor dengan 120° . Hasil-kali dua buah Bilangan kompleks adalah hasil-kali besarannya dan jumlah sudut

fasanya. Jika bilangan kompleks yang menyatakan fasor dikalikan dengan bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 0° , bilangan kompleks yang dihasilkan adalah fasor yang sama besar dengan fasor aslinya tetapi fasanya tergeser dengan sudut 0° . Bilangan kompleks dengan besar satu dan sudut 0° merupakan operator yang Memutar fasor yang dikenakannya melalui sudut 0° .

Kita sudah kenal dengan operator j , yang menyebabkan perputaran sebesar 90° , dan operator -1 , yang menyebabkan perputaran sebesar 180° . Penggunaan operator j Sebanyak dua kali berturut-turut akan menyebabkan perputaran melalui $90^\circ + 90^\circ$, yang membawa kita pada kesimpulan bahwa $j \times j$ menyebabkan perputaran sebesar 180° , dan karena itu kita ingat kembali bahwa j^2 adalah sama dengan -1 . Pangkat yang lain dari operator j dapat diperoleh dengan analisis yang serupa. Huruf a biasanya digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan perputaran sebesar 120° dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Operator semacam ini adalah bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 120° dan didefinisikan.

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0,5 + j0,866$$

IMPEDANSI URUTAN DAN JARINGAN URUTAN

Dalam setiap bagian rangkaian, jatuh tegangan yang disebabkan oleh arus dengan urutan tertentu tergantung pada impedansi bagian rangkaian itu terhadap arus dengan urutan tersebut. Impedansi setiap bagian suatu jaringan yang seimbang terhadap arus salah satu urutan dapat berbeda dengan impedansi terhadap arus dari Urutan yang lain. Impedansi suatu rangkaian yang hanya mengalir arus urutan positif disebut *impedansi terhadap arus urutan-positif*. Demikian pula, bila hanya ada arus urutan-negatif, impedansinya dinamakan

impedansi terhadap arus urutan-negatif. Jika hanya ada arus urutan nol, impedansinya dinamakan *impedansi terhadap arus urutan-nol*. Sebutan impedansi rangkaian terhadap arus dari urutan yang berbeda, ini biasanya disingkat menjadi istilah yang sebenarnya kurang jelas artinya, yaitu *impedansi urutan-positif*, *impedansi urutan-negatif* dan *impedansi urutan-nol*.