

Karya Ilmiah :

Studi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik Pada Proses Switching Di Jaringan Tegangan Tinggi 150 KV



OLEH :

YANCE SYARIF

NIP : 131 622 009

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2005

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT karena atas segala Rahmat dan Petunjuk-Nyalah hingga segala sesuatu dan tanggung jawab yang diamanahkan pada penulis dalam menyelesaikan karya ilmiah ini.

Adapun judul karya ilmiah ini adalah **Studi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik pada Proses Switching di Jaringan Tegangan Tinggi 150 KV**. Diharapkan dapat menjadi tambahan koleksi pada perpustakaan sehingga dapat bermanfaat bagi kalangan akademisi di lingkungan Institut Teknologi Medan.

Dalam penyelesaian yang dicapai pada penulisan karya ilmiah ini adalah berkat bantuan dan kerjasama yang baik dari semua pihak yang membantu penulis.

Pada akhirnya penulis hanya mampu menyerahkan kepada Allah SWT, semoga amal baik dari semua pihak senantiasa mendapat pahala yang setimpal. Dan kepada pihak yang memberikan saran dan koreksi guna penyempurnaan karya ilmiah ini dengan senang hati penulis menerimanya. Semoga Allah senantiasa memberikan Rahmat-Nya kepada kita semua serta perlindungan dalam menjalankan rutinitas sehari-hari. Amin.

Medan, 2005

Penulis

Yance Syarief

NIP: 131 622 009

DAFTAR ISI

Lembaran Judul	i
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1. Umum	1
I.2. Latar Belakang Permasalahan.....	2
I.3. Permasalahan	3
I.3. Pembatasan Masalah	4
BAB II STABILITAS SISTEM TENAGA.....	6
II.1. Kriteria Stabilitas	6
II.2. Kestabilan Peralihan (Transient)	6
II.2.1. Pengoperasian Penghubung	7
II.2.2. Gangguan dan Diikuti Pemisahan Rangkaian	8
II.3. Pemutus Daya (Switching)	11
II.3.1. Besaran-besaran (Rating) dari Pemutus Daya.....	12
II.4. Tegangan Pemulihan Kontak (Transient Recovery Voltage).....	15
II.4.1. Tegangan Pemulihan Rangkaian Resistif	16
II.4.2. Tegangan Pemulihan Rangkaian Kapasitif	17
II.4.3. Tegangan Pemulihan Rangkaian Induktif.....	18
BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN	21
III.1. Sebab-Sebab Gelombang Berjalan	21
III.2. Bentuk dan Spesifikasi Gelombang Berjalan	22
III.3. Bentuk Matematis Gelombang Berjalan	23
III.4. Menentukan Persamaan Gelombang Berjalan Akibat Surja Hubung	25
III.5. Menentukan Persamaan Arus Peralihan pada Proses Switching	27
BAB IV KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK PADA PROSES SWITCHING DI JARINGAN TEGANGAN TINGGI 150 KV	33
IV.1. Efek Gelombang Berjalan Akibat Proses Switching	33
IV.2. Penganalisaan Arus Peralihan (Transient) Akibat Proses Switching	37
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	42
6.1. Kesimpulan	42
6.2. Saran	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 UMUM

Setiap kesalahan dalam suatu rangkaian yang menyebabkan terganggunya aliran arus yang normal disebut gangguan. Sebagian besar dari gangguan-gangguan yang terjadi pada saluran transmisi bertegangan 150 kV atau lebih disebabkan oleh petir, yang mengakibatkan terjadinya percikan bunga api (*flash over*) pada isolator. Tegangan tinggi yang ada diantara penghantar dan menara atau tiang penyangga yang diketanahkan (*grounded*) menyebabkan terjadinya ionisasi. Ini memberikan jalan bagi muatan listrik yang diinduksi (*diimbis*) oleh petir untuk mengalir ke tanah. Dengan terbentuknya jalur ionisasi, impedansi ke tanah menjadi rendah. Ini memungkinkan mengalirnya arus fasa dari penghantar ke tanah dan melalui tanah menuju “netral”-nya transformator atau generator yang diketanahkan, sehingga terjadilah rangkaian yang tertutup. Gangguan langsung dari fasa ke fasa tanpa melalui tanah jarang terjadi.

Dengan membuka pemutus-rangkaian, dan dengan demikian mengisolasi bagian saluran yang terganggu dari keseluruhan sistem, aliran arus lewat jalur ionisasi akan terputus dan ini memungkinkan terjadinya de-ionisasi. Setelah proses de-ionisasi dibiarkan berjalan 20 siklus, pemutus rangkaian biasanya dapat ditutup kembali tanpa menimbulkan percikan ulang. Dari pengalaman pengoperasian saluran transmisi diketahui bahwa “*ultra high speed reclosing breakers*” (pemutus yang

menutup kembali dengan kecepatan tinggi) dapat menutup kembali dengan baik setelah terjadinya gangguan yang bermacam ragam. Pada kasus dimana penutupan kembali tidak berhasil dengan baik, ternyata bahwa sebahagian besar dari kegagalan ini disebabkan oleh kesalahan lain yang permanen, dimana penutupan kembali tetap tidak akan mungkin terjadi meskipun interval antara pembukaan dan penutupan diperpanjang terus. Kesalahan permanen dapat disebabkan oleh saluran yang terhubung ke tanah, rangkaian isolator yang pecah karena sesuatu beban, misalnya beban es, kerusakan pada menara, dan karena tidak berfungsinya alat penangkal petir.

Angka-angka pengalaman menunjukkan bahwa kira-kira 70 % dan 80 % dari gangguan saluran transmisi adalah gangguan tunggal saluran transmisi adalah gangguan tunggal dari saluran ke tanah, yang terjadi karena flash over dari satu saluran saja ke menara dan tanah. Gangguan yang paling jarang terjadi, yaitu hanya kira-kira 5 %, adalah gangguan yang melibatkan sekaligus tiga fasa dan disebut gangguan tiga fasa.

Gangguan jenis lain pada saluran transmisi adalah gangguan antara satu saluran dengan saluran lainnya tanpa melibatkan tanah, dan gangguan antara dua saluran dan tanah. Kecuali gangguan tiga fasa, semua gangguan tersebut diatas bersifat tidak simetris dan menyebabkan ketidakseimbangan diantara fasa-fasa.

I.2 LATAR BELAKANG PERMASALAHAN

Studi kestabilan terbagi dalam studi untuk keadaan-tetap (*steady-state*) dan kondisi peralihan. Selalu ada batas tertentu bagi besarnya daya yang dapat dihasilkan

oleh sebuah generator a.c., dan dari besarnya beban yang dapat dipikul oleh sebuah motor serempak. Jika masukan mekanis kepada suatu generator atau beban mekanis pada suatu motor melebihi batas tersebut diatas, akan terjadilah ketidakstabilan. Batas inilah yang dinamakan **batas kestabilan**. Suatu batas daya akan dicapai, juga dengan perubahan yang terjadi dengan berangsur-angsur. Gangguan pada suatu sistem, yang disebabkan oleh beban-beban yang dihubungkan dengan seketika (mendadak), atau oleh terjadinya gangguan lain, atau oleh hilangnya penguatan didalam medan sebuah generator, dan oleh switching, dapat menyebabkan hilangnya keadaan serempak, meskipun perubahan yang diakibatkan oleh gangguan tersebut tidak melebihi batas kestabilan, yaitu yang dicapai dengan perubahan yang berangsur-angsur.

Batas kestabilan peralihan ialah batas daya dimana titik ketidakstabilan dicapai dengan perubahan kondisi sistem yang mendadak, sedangkan **batas kestabilan keadaan tetap** ialah yang dicapai dengan perubahan yang berangsur-angsur.

I.3 PERMASALAHAN

Salah satu gangguan yang sangat berbahaya pada suatu sistem tenaga listrik adalah pada saat proses switching berlangsung. Dimana permasalahan yang utama pada saat proses switching ini berlangsung ialah apabila terjadi pemutusan arus yang disebabkan hubung singkat atau pemutusan arus hubung singkat (biasanya mendekati suatu rangkaian yang mengandung R, L & C) maka akan timbul yang disebut dengan **Recovery Voltage** atau tegangan pemulihan, dan selanjutnya bagian transient dari

Recovery Voltage ini akan timbul yang dinamakan dengan *Transient Recovery Voltage* atau *Restriking Voltage*. Recovery Voltage ini menimbulkan terpaan medan elektrik di sela kontak. Kenaikkan kuat medan elektrik yang ditimbulkannya tergantung pada kenaikan tegangan pemulihan (*Recovery Voltage*). Jika kenaikan terpaan medan elektrik lebih cepat dari kenaikan kekuatan dielektrik sela, maka media sela kontak akan tembus listrik sehingga busur api timbul lagi. Dengan perkataan lain pemutusan daya (proses *switching*) gagal memutuskan arus. Apalagi arus yang disebabkan oleh arus gangguan hubung singkat yang akhirnya akan mengakibatkan kerusakan pada generator dan transformator daya atau yang lebih menakutkan lagi adalah generator dengan tiba-tiba dipaksa bekerja mengeluarkan daya yang besar. Perubahan kerja yang tiba-tiba ini dapat menimbulkan ketidakstabilan sistem.

I.4 PEMBATASAN MASALAH

Untuk membahas dan mempelajari kestabilan analisa sistem tenaga listrik akibat proses *switching*, maka penulis perlu membuat suatu batasan masalah, karena persoalan *switching* ini mempunyai cakupan yang sangat luas.

Dalam batasan masalah ini penulis tidak membahas mengenai :

- Jenis-jenis dari peralatan *switching*
- Cara kerja serta konstruksi didalam peralatan *switching* itu sendiri.

Penulis hanya menitik-beratkan pada tegangan lebih transient (*transient over voltages*) yang terjadi pada suatu sistem tenaga yang ditimbulkan oleh kerja switching tersebut.

I.5 TUJUAN PENULISAN

Tujuan penulisan ini dimaksudkan untuk menganalisa proses dari switching, yang mana selanjutnya akan menyebabkan terjadinya tegangan lebih transient (*transient over voltage*) dan arus lebih transient yang terjadi pada sistem tenaga.

Dimana arus dan tegangan transient ini dapat menyebabkan amplitudo gelombang tegangan melebihi tegangan puncak tegangan bolak-balik dari tegangan operasi sistem yang normal.

BAB II

STABILITAS SISTEM TENAGA

II.1. KRITERIA STABILITAS

Kestabilan adalah keadaan pada sistem daya atau bagian dari sistem, yang memungkinkan bertambahnya daya yang tersimpan antara bagian-bagian dari sistem, sama atau lebih besar dari pada gaya yang menyebabkan gangguan dari keseimbangan antara bagian – bagian dari sistem.

Batas kestabilan adalah harga maksimum dari daya yang mengalir melalui dari suatu titik tertentu pada sistem tenaga listrik, atau bagian dari sistem tenaga listrik yang masih diijinkan untuk pengoperasian yang stabil.

Terdapat dua kondisi stabil yaitu:

- Stabilitas mantap
- Stabilitas peralihan

II.2. KESTABILAN PERALIHAN (TRANSIENT)

Yang dimaksud dengan batas kestabilan peralihan (*transient*) adalah harga maksimum dari gaya yang dapat disalurkan dari suatu sistem ke sistem yang lain, sedemikian rupa sehingga bila terjadi gangguan sementara atau yang menetap sistem itu tetap stabil. Untuk mengetahui batas kestabilan transien atau peralihan, perlu

diketahui adanya faktor-faktor yang menyebabkan keadaan transien atau yang mempengaruhi kestabilan antara lain :

- Pengoperasian penghubung.
- Gangguan dan diikuti pemisahan rangkaian.

II.2.1. Pengoperasian Penghubung (Switching)

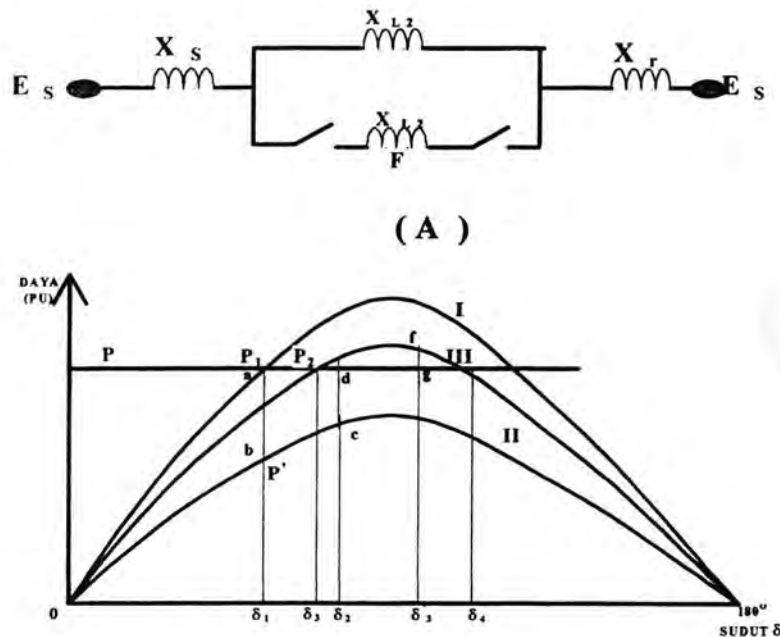
Untuk pengoperasian penghubung dapat diselidiki dengan menggunakan kriteria sama luas. Pada kasus pengoperasian penghubung, digunakan dua kurva sudut daya dengan pertimbangan sebagai berikut :

- Kurva sudut daya untuk kondisi awal.
- Kurva sudut daya untuk kondisi setelah pengoperasian penghubung.

Gambar 2.1-A menggambarkan suatu sistem dengan dua saluran. Gambar 2.1-B menunjukkan dua kurva sudut daya, kurva I digunakan untuk kondisi rangkaian setelah dilakukan pengoperasian penghubung.

Pada gambar 2.1 terlihat bahwa daya yang disalurkan adalah P . Untuk kondisi pengoperasian awal, daya yang disalurkan pada saat sudut daya δ_1 adalah P_1 dan untuk pengoperasian akhir pada sudut daya δ_2 dan daya P_2 . pada waktu pengoperasian penghubung, daya keluaran akan berkurang dari P_1 ke P' . perubahan ini mengakibatkan penambahan daya $(P-P')$, yang dipergunakan untuk mempercepat generator dan memperlambat motor pada beban, kedua perubahan ini cenderung memperbesar sudut dayanya. Dengan demikian kedua mesin menyimpang dari

kecepatan sinkronnya atau yang lebih umumnya dapat dikatakan sistem tenaga listrik mengalami ketidakstabilan.



Gambar 2.1
Diagram sudut daya untuk kondisi
awal dan setelah pengoperasian penghubung

Besarnya daya yang dapat disalurkan tanpa rugi-rugi sinkron didasarkan kepada :

1. Batas kestabilan keadaan mantap untuk kondisi setelah pengoperasian penghubung dilakukan.
2. Perbedaan antara sudut pengoperasian keadaan mantap awal dan akhir.

II.2.2. Gangguan Dan Diikuti Pemisahan Rangkaian

Untuk mengetahui batas kestabilan transien yang paling penting adalah pada saat terjadi gangguan yang diikuti pemisahan rangkaian untuk mengisolasi gangguan. Untuk keadaan gangguan seperti diatas, perlu ditinjau beberapa keadaan, antara lain:

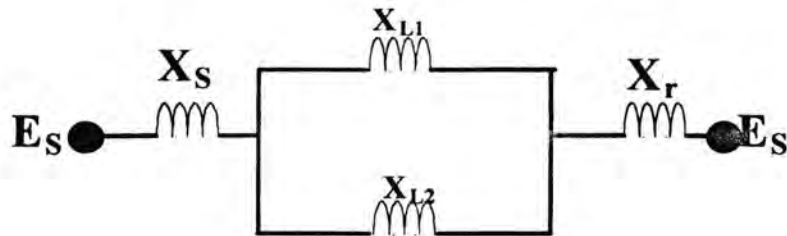
- Keadaan awal sebelum adanya gangguan.
- Keadaan selama adanya gangguan.
- Keadaan setelah gangguan dihilangkan.

Sistem transmisi yang ditunjukkan pada gambar 2.2, menunjukkan salah satu saluran terjadi gangguan. Diagram sudut daya untuk dua saluran dalam keadaan sebelum gangguan, ditunjukkan pada gambar 2.3 oleh kurva I.

Daya yang disalurkan pada sudut δ_1 sebesar P_1 . Saat terjadi gangguan daya yang dapat disalurkan akan berkurang hal ini ditunjukkan pada gambar 2.3. Pada kurva II melalui titik a dan c. Diagram sudut daya untuk kondisi akhir setelah gangguan dipisahkan yang ditunjukkan pada kurva III. Daya yang dapat disalurkan pada sudut δ_3 sebesar P_3 . Saat terjadi gangguan, keluaran daya generator dan masukan daya berkurang dari P sampai P' .

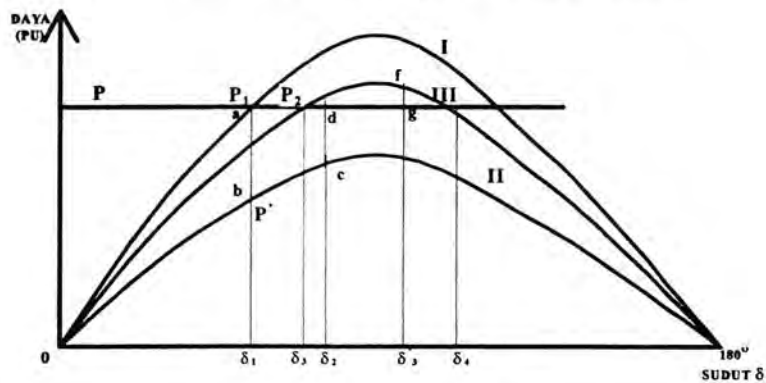
Diasumsikan bahwa gangguan dihilangkan pada waktu sistem berayun sampai δ_2 . Pada titik ini penyaluran daya sampai kondisi rangkaian akhir yaitu kurva III. Diagram sudut daya menunjukkan bahwa keluaran daya generator melebihi masukan, sehingga rotor generator diperlambat dan motor pada beban dipercepat yang pada akhirnya akan menyebabkan ke tidak stabilan sistem. Karena adanya energi yang tersimpan dalam mesin, sistem memperbesar ayunannya dengan sudut

yang lebih besar δ_3 , sehingga luasan defg sama dengan luas abcd. Dengan demikian δ_3 merupakan titik maksimum yang dicapai saat sistem mengalami osilasi.



Gambar 2.2

Hubungan Sistem Penyaluran Daya Yang Terganggu



Gambar 2.3

Grafik Sudut Daya Untuk Analisis Kestabilan Karena Gangguan

Karena adanya peredaman dari osilasi akan berakhir pada δ_3 , jika kekuatan gangguannya lebih besar, maka hal ini ditunjukkan dengan berkurangnya daya yang dapat disalurkan atau waktu gangguan yang lebih lama, sebagaimana ditunjukkan dengan semakin besarnya δ_2 , atau diagram sudut daya untuk kondisi akhir

mempunyai daya maksimum lebih rendah. Jika sudut daya selama sistem berisolasi hingga melebihi δ_3 , maka suatu ketika akan mencapai sudut kritis δ_4 .

Untuk daya yang dapat disalurkan pada sudut ini disebut batas kestabilan transien. Untuk perhitungan kestabilan transien, ada beberapa kondisi yang tergantung pada tinjauan dari sifat-sifat transien. Dimana untuk penambahan beban, batas kestabilan transien tergantung pada beban awal dan kenaikan beban. Untuk pengoperasian penghubung, batas kestabilan transien tergantung pada batas kestabilan keadaan akhir dan sudut daya awal. Batas kestabilan untuk gangguan yang diikuti pemisahan rangkaian tergantung pada sudut daya awal, macamnya gangguan, dan lamanya gangguan serta batas kestabilan keadaan akhirnya (setelah gangguan dihilangkan).

II.3. PEMUTUS DAYA (SWITCHING)

Untuk mempermudah dalam membuka dan menutup suatu rangkaian dalam suatu sistem tenaga listrik baik dalam keadaan normal maupun dalam keadaan gangguan, maka antar kedua rangkaian yang berdekatan dipasang peralatan yang disebut pemutus beban atau pemutus daya (PMT). Pemutus beban yang hanya mampu memutus arus tanpa beban saja disebut saklar pemisah.

Sedangkan peralatan pemutus yang mampu memutus arus beban dan arus gangguan dinamakan pemutus tenaga (PMT, biasa digunakan dalam praktek tenaga). Pemutus tenaga/pemutus beban diperlengkapi peralatan tambahan yang mampu mendeteksi keadaan rangkaian, apabila terjadi gangguan maka peralatan tersebut

akan memberikan isyarat kepada pemutus beban, yaitu rele. Pemutus daya yang mempunyai kapasitas arus pemutusan tertentu memerlukan peralatan bantu untuk memadamkan busur api yang mungkin timbul pada saat pemutusan.

II.3.1. BESARAN-BESARAN (RATING) DARI PEMUTUS DAYA

II.3.1.1. Rating Tegangan

Rating tegangan pemutus daya adalah tegangan maksimum sistem dimana pemutus daya dirancang. Standard tegangan IEC untuk tegangan diatas 72,5 KV adalah : 100, 123, 145, 170, 245, 300, 362, 420, 525, 765 KV. Standard ini didasarkan atas operasi pada ketinggian 1000 m (3300 feet) atau kurang. Bila pemutus daya dioperasikan pada ketinggian lebih besar dari 1000 m diatas permukaan laut maka tegangan operasi harus dikalikan dengan faktor koreksi tegangan dalam tabel dibawah ini, oleh karena makin tinggi suatu tempat kerapatan udara relatif makin turun sehingga tegangan flash over juga menurun.

Ketinggian (feet)	Faktor koreksi tegangan
3300	1,00
4000	0,98
5000	0,95
10000	0,80

II.3.1.2. Rating Arus Normal

Rating arus normal adalah harga arus efektif yang mampu dialirkan melalui pemutus daya secara terus menerus, tanpa melalui temperatur yang diperkenankan.

Standard rating arus normal pemutus daya yang direkomendasikan oleh IEC adalah 400, 0630, 800, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000 dan 6300 ampere.

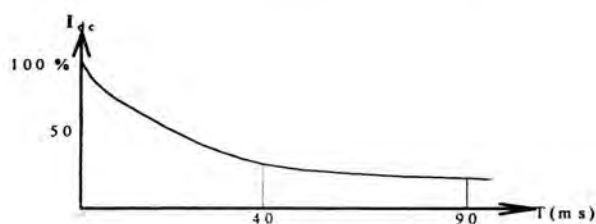
II.3.1.3. Rating Pemutusan Arus Hubung Singkat

Rating pemutusan arus hubung singkat dinyatakan dalam dua besaran, yaitu

- r.m.s dari komponen arus bolak-balik.
- presentasi komponen arus searah.

Nilai rms komponen arus bolak-balik menurut standard IEC adalah sebagai berikut : 6.3, 8, 10, 12.5, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100 dalam kA.

Komponen arus searah tergantung pada waktu pemutusan, dan dinyatakan dalam persen dari arus rating arus bolak-balik. Presentase dari komponen a.b.b ini dapat ditentukan dari gambar dibawah ini (gambar 2.4).



Gambar 2.4. Hubungan I_{dc} dengan waktu.
t = waktu setelah terjadinya h.s

II.3.1.4. Rating Pemutusan Arus Pengisian Saluran (Line Charging Breaking Current)

Rating pemutusan arus pengisian saluran adalah harga terbesar arus pengisian saluran yang mampu diputuskan dengan aman. Arus pengisian adalah kapasitif dan relatif sukar untuk diputuskan. Standard IEC adalah sebagai berikut :

Rating tegangan (kv)	Rating arus pemutusan Arus pengisian (Amp)
72.5	10
100	20
123	31.5
145	50
170	63
245	125
300	200
362	315
420	400
525	500

II.3.1.5. Rating Kapasitas Pemutus Daya

Rating kapasitas pemutus daya adalah : daya terbesar yang dapat diputuskan oleh pemutus daya dengan aman pada rating tegangannya.

Rating ini tidak boleh dilampaui oleh daya hubung singkat. Misalnya, arus hubung singkat terbesar yang mengalir melalui pemutus daya (pada waktu pemutusan) adalah I dan V adalah tegangan fasa ke fasa, maka kapasitas minimum dari pemutus daya yang dipakai adalah : $f \cdot \sqrt{3}VI$, dimana F = faktor pengali karena adanya pengaruh komponen arus searah. Pengaruh redaman tergantung dari R dan X dari

jaringan, dan karenanya faktor arus searah = f , tergantung juga oleh X dan R ini. F sering diambil = 1,0.

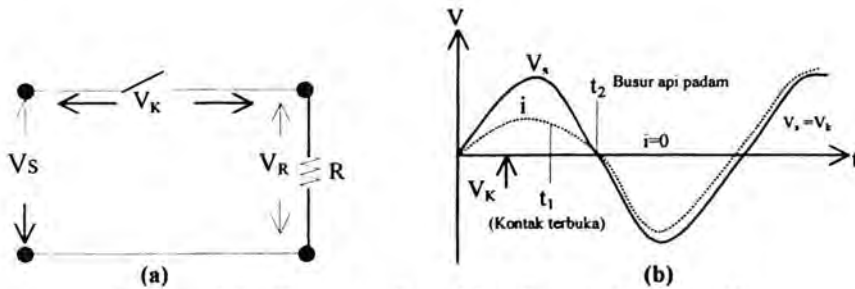
II.4. TEGANGAN PEMULIHAN KONTAK (*TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE*)

Jika pemutus daya digunakan memutuskan arus bolak-balik, maka ada saatnya arus berharga nol dan pada saat itu busur api akan padam. Selanjutnya media sela kontak akan memulihkan dirinya menjadi isolasi, yaitu dengan berangsur-angsur menaikkan kekuatan dielektriknya. Pada saat yang bersamaan, tegangan disela kontak yang tadinya sangat kecil menjadi relatif besar. Dengan perkataan lain, tegangan sela kontak dipulihkan dari harga yang sangat kecil ke suatu harga tegangan yang seharusnya terjadi pada sela kontak terbuka. Tegangan sela kontak selama busur api padam disebut tegangan pemulihan (*recovery voltage*).

Tegangan pemulihan ini menimbulkan terpaan medan elektrik di sela kontak. Kenaikkan medan elektrik yang ditimbulkannya tergantung kepada kenaikan tegangan pemulihan. Jika kenaikan terpaan medan elektrik lebih cepat dari kenaikan kekuatan dielektrik sela, maka media sela kontak akan tembus listrik sehingga busur api timbul lagi. Dengan perkataan lain, pemutus daya gagal memutuskan arus. Oleh karena itu, kenaikan tegangan pemulihan pada suatu pemutus daya perlu diketahui.

Tegangan pemulihan pada kontak suatu pemutus daya tergantung kepada karakteristik dari rangkaian sistem yang hubungannya akan diputuskan.

II.4.1. Tegangan Pemulihan Rangkaian Resistif



Gambar 2.5. Tegangan Pemulihan Rangkaian Resistif

Mengacu kepada gambar 2.5, persamaan tegangan pada rangkaian ini adalah :

$$V_s = V_k + V_r \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana : V_s = tegangan sumber

V_k = tegangan sela kontak

V_r = tegangan resistor

Tegangan kontak adalah : $V_k = V_s - V_r \dots\dots\dots 2.2$

Saat kontak tertutup, tegangan kontak adalah nol. Misalkan kontak dipisahkan saat $t = t_1$, maka timbul busur api dalam selang waktu $t_1 - t_2$. Dalam selang waktu ini, tegangan kontak naik menjadi : $V_k = I R_a \dots\dots\dots 2.3$

dimana : I = Arus busur api

R_a = Tahanan busur api.

Karena tahanan busur api relatif kecil, maka tegangan kontak hanya beberapa volt, sehingga dapat diabaikan. Kemudian busur api pada saat $t = t_2$ dan mulai saat ini arus pada rangkaian sama dengan nol, sehingga tegangan pada resistor juga sama dengan nol. sehingga tegangan pada resistor sama dengan nol ($V_r = 0$). Terhitung mulai $t = t_2$, tegangan pemulihan kontak menjadi :

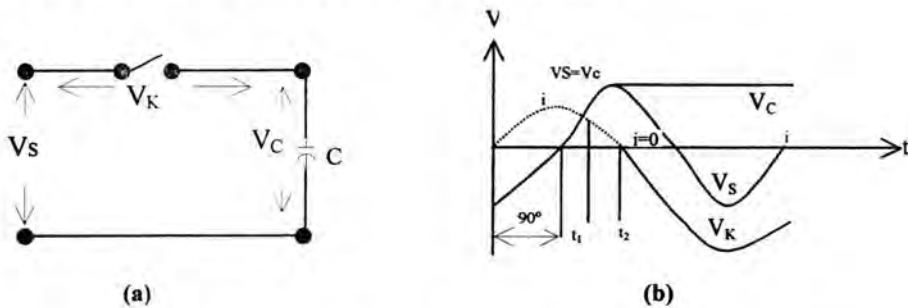
$$V_k = V_s \dots\dots\dots 2.4$$

Kenaikkan tegangan pemulihan sama dengan kenaikan tegangan sumber. Jika saat busur api mulai padam diambil sebagai acuan waktu, maka harga sesaat tegangan kontak adalah:

$$V_k = -\hat{V} \sin \omega t \dots\dots\dots 2.5$$

Dimana : \hat{V} = Nilai puncak tegangan sesaat sumber.

II.4.2. Tegangan Pemulihan Rangkaian Kapasitif



Gambar 2.6. Tegangan Pemulihan Rangkaian Kapasitif

Pada gambar 2.6.a. ditunjukkan suatu rangkaian kapasitif. Sebelum kontak pemutus daya terbuka, arus pada rangkaian ini terdahulu 90° listrik dari tegangan, seperti ditunjukkan pada gambar 2.6.b. Sebelum kontak terbuka, persamaan tegangan adalah sebagai berikut :

$$V_s = V_k + V_c \dots\dots\dots 2.6$$

Dimana : V_c = tegangan pada kapasitor

Jika tegangan kontak diabaikan, maka tegangan kondensator sama dengan tegangan sumber.

Tegangan dalam kontak dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_k = V_s - V_c \dots\dots\dots 2.7$$

Misalkan saat $t=t_1$, kontak pemutus daya dibuka. Dalam selang waktu $t_1 - t_2$, timbul busur api. Selama ada busur api, tegangan kondensator sama dengan tegangan sumber. Saat arus sama dengan nol, yaitu saat $t = t_2$, busur api sama dengan nilai puncak tegangan sesaat sumber, sehingga persamaan tegangan kontak setelah busur api padam adalah :

$$V_k = V_s - \hat{V} \dots\dots\dots 2.8$$

Jika saat busur api mulai padam diambil sebagai acuan waktu, maka nilai sesaat tegangan kontak adalah :

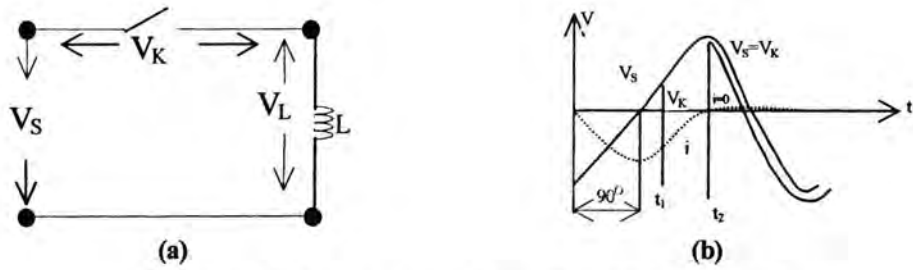
$$V_k = \hat{V} \cos \omega t - \hat{V} \dots\dots\dots 2.9$$

Bentuk gelombang tegangan pemulihan adalah ditunjukkan pada gambar 2.6b. Terlihat bahwa kenaikan tegangan pemulihan relatif lambat dibandingkan dengan tegangan kenaikan pada rangkaian resistif. Tetapi tegangan kontak dapat mencapai dua kali harga puncak tegangan sesaat sumber. Hal ini memberi peluang terjadinya terpaan balik busur api.

II.4.3. Tegangan Pemulihan Rangkaian Induktif

Pada gambar 2.7.a, ditunjukkan suatu rangkaian induktif. Sebelum kontak pemutus daya terbuka, arus pada rangkaian ini terbelakang 90° listrik dari tegangan. persamaan tegangan adalah sebagai berikut :

$$V_s = V_k + V_l \dots\dots\dots 2.10$$



Gambar 2.7. Tegangan Pemulihan Rangkaian Induktif

Dimana : V_l = tegangan pada induktor

$$= L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots 2.11$$

Jika tegangan kontak diabaikan, maka tegangan induktor sama dengan tegangan sumber atau ; $V_l = V_s$.

Tegangan pada kontak dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_k = V_s - V_l \dots\dots\dots 2.12$$

Misalkan saat $t=t_1$, kontak pemutus daya dibuka. Dalam selang waktu $t_1 - t_2$, timbul busur api. Selama ada busur api, tegangan induktor sama dengan tegangan sumber. Saat $t=t_2$, arus sama dengan nol dan busur api padam. Pada saat itu tegangan induktor sama dengan nol (karena harga I pada persamaan 2.11, sama dengan nol), sehingga persamaan tegangan kontak setelah busur api padam adalah :

$$V_k = V_s \dots\dots\dots 2.13$$

Jika saat busur api mulai padam diambil sebagai acuan waktu, maka harga sesaat tegangan kontak adalah :

$$V_k = \hat{V} \cos \omega t \dots\dots\dots 2.14$$

Bentuk tegangan pemulihan ditunjukkan pada gambar 2.7.b. Terlihat bahwa tegangan kontak tiba-tiba mencapai nilai puncak tegangan sesaat sumber. Kenaikkan tegangan 'sumber relatif cepat dibandingkan dengan tegangan pemulihan pada rangkaian resistif. Hal ini memberi peluang yang besar bagi terjadinya terpaan balik busur api.

BAB III

METODOLOGI PENYELESAIAN

3.1. Sebab-Sebab Gelombang Berjalan

Gelombang berjalan yang terjadi pada sistem penyaluran terjadi karena adanya beberapa sebab, yaitu ;

- a. Sambaran kilat secara langsung pada kawat.
- b. Sambaran kilat secara tidak langsung pada kawat (induksi).
- c. Operasi pemutusan (*switching operation*).
- d. Busur tanah (*arching ground*).
- e. Gangguan-gangguan pada sistem oleh berbagai-bagai kesalahan.
- f. Tegangan mantap sistem.

Semua sebab-sebab diatas menimbulkan surja (*surge*) pada kawat, yaitu surja tegangan dan surja arus.

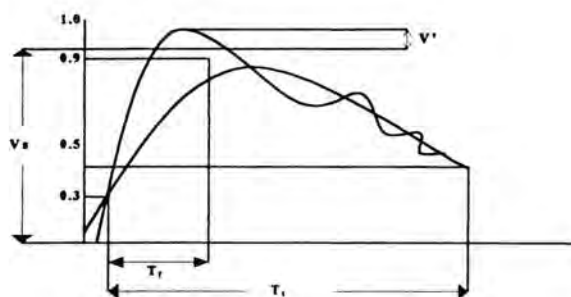
Dilihat dari sudut energi maka surja pada saluran, dapat dikatakan sebagai penyuntikan energi tiba-tiba pada saluran. Energi ini akan merambat pada saluran, sama halnya seperti kita melemparkan batu pada air yang tenang dalam sebuah kolam. Energi yang merambat ini terdiri dari arus dan tegangan.

Kecepatan merambat gelombang berjalan tergantung dari konstanta-konstanta kawat. Pada kawat diudara, kecepatan merambat ini kira-kira $3 \cdot 10^8$ m/detik. Jadi sama dengan kecepatan cahaya. Apabila dalam perambatannya gelombang

tegangan dan arus tersebut menemui atau mencapai titik peralihan atau diskontinuitas pada penghantarnya maka akan terjadi perubahan pada gelombang tersebut. Pengaruh perubahan ini perlu diperhatikan karena amplitudo pada titik peralihan akan lebih besar dari pada gelombang asal.

3.2. Bentuk Dan Spesifikasi Gelombang Berjalan

Bentuk umum dari suatu gelombang berjalan adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1

Spesifikasi gelombang berjalan

Spesifikasi dari suatu gelombang berjalan :

- Puncak (*crest*) gelombang, E (KV), yaitu amplitudo maksimum dari gelombang.
- Muka gelombang (*wave front*), adalah bagian gelombang yang terjadi antara titik nol nominal dari gelombang sampai puncak.

Titik nominal adalah perpotongan antara sumbu waktu sampai garis lurus yang menghubungkan titik 30% dan 90% dari tegangan puncak (menurut

standard IEC). Waktu muka gelombang (T_f) adalah lama terjadinya muka gelombang.

- c. Ekor gelombang (*wave tail*) adalah bagian dibelakang puncak. Waktu ekor gelombang (T_f) adalah waktu di titik nominal sampai setengah puncak (50% E) pada ekor gelombang.
- d. Polaritas dari gelombang, positif atau negatif.

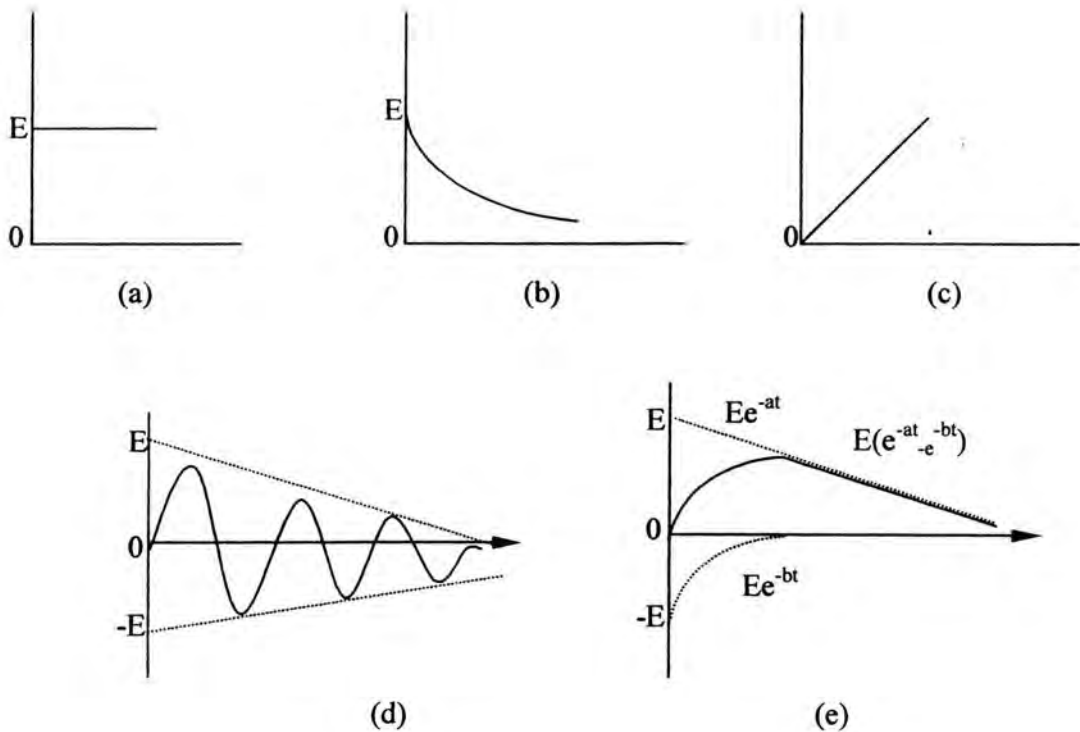
3.3. Bentuk Matematis Gelombang Berjalan

Bentuk dasar dari gelombang berjalan secara sistematis dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$e(t) = E(e^{-at} - e^{-bt}) \dots\dots\dots 2.15$$

dimana : E, a dan b adalah konstanta.

Dari variasi a dan b dapat dibuat berbagai macam bentuk gelombang yang dapat dipakai sebagai pendekatan dari gelombang berjalan. Variasi gelombang itu ditunjukkan pada gambar 3.2 berikut ini. Dan bentuk-bentuk gelombang yang lain dapat dimisalkan sebagai kombinasi dari bentuk gelombang diatas.



Keterangan gambar :

- Gelombang persegi yang sangat panjang dengan : $a=0$, $b \rightarrow \infty$, sehingga $e = E_0$.
- Gelombang eksponensial dengan : $b \rightarrow \infty$, sehingga $e = E e^{-at}$.
- Gelombang dengan muka linier dengan : $a = 0$, $b \rightarrow 0$, $E \rightarrow \infty$ dan bE terbatas

(finite). Sehingga

$$e = E(1 - e^{-bt})$$

$$= E(bt - b^2 t^2 / 2 + \dots)$$

- Gelombang sinus teredam dengan :

$$a = \alpha - j\omega$$

$$b = \alpha + j\omega$$

$$E = E_0 / 2j$$

$$e = E_0 / 2j e^{-\alpha t} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t})$$

$$= E e^{-\alpha t} \sin \omega t$$

- e. Gelombang kilt tipikal, dengan a, b dan E adalah terbatas dan riil.

Gelombang kilat tipikal merupakan bentuk yang paling mirip dengan bentuk gelombang surja kilat (*lightning surge*) maupun surja hubung yang dilihat pada osiloskop. Bentuk gelombang ini tergantung dari harga-harga a dan b . Sebaliknya bila spesifikasi gelombang diberikan a, b dan E dapat dicari dan bila E, a, b diketahui, maka dapat dicari spesifikasi gelombang puncak, dan panjang gelombang itu.

3.4. Menentukan Persamaan Gelombang Berjalan Akibat Surja Hubung

Di dalam praktek harga yang ditentukan pada gelombang berjalan adalah lama waktu muka, waktu ekor dan harga maks gelombang tersebut, sedangkan yang harus dicari adalah harga a, b dan E untuk menentukan harga-harga tersebut diperlukan dua persamaan :

1. Yang menyatakan bahwa harga maks terjadi pada saat $dE/dt = 0$ dan $t = T_f$, sehingga diperoleh waktu puncak.

$$T_f = -\frac{1}{a-b} \ln \frac{b}{a} \dots\dots\dots 2.16$$

2. Yang menyatakan bahwa harga maks itu akan turun menjadi setengahnya dalam waktu T_f , maka :

$$(e^{-aT_f} - e^{-bT_f}) = \frac{1}{2}(e^{-aT_f} - e^{-bT_f}) \dots\dots\dots 2.17$$

Secara teoritis a dan b dapat dicari dari dua persamaan diatas bila T_f dan T_r diketahui. Tetapi karena penyelesaian agak sulit, maka dipakai penyederhanaan

bahwa $b > a$ dan $T_t \gg T_f$, karena itu e^{-aT_f} . Sehingga bila persamaan (2.16) dimasukkan dalam (2.17) akan terjadi penyederhanaan :

$$\exp\left(-\frac{ak}{a-b} \ln \frac{b}{a}\right) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{a}{a-b} \ln \frac{b}{a}\right) - \exp\left(-\frac{b}{a-b} \ln \frac{b}{a}\right) \dots\dots\dots 2.18$$

dimana : $k = \frac{T_t}{T_f}$

Apabila ditulis $B = \frac{b}{a}$, maka persamaan (2.18) berubah menjadi :

$$\exp\left(-\frac{k}{1-B} \ln B\right) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{1-B} \ln B\right) - \exp\left(-\frac{B}{1-B} \ln B\right) \dots\dots\dots 2.19$$

Dari persamaan ini dapat ditarik sebuah lengkung yang menghubungkan k dengan ln B, yang tertera gambar 3.3 dibawah.

Jadi untuk tiap bentuk gelombang dimana T_f dan T_t diketahui maka harga k dan B dapat dihitung.

Selanjutnya bila :

$$a = \gamma - \delta \dots\dots\dots 2.20$$

$$\text{dan } b = \gamma + \delta \dots\dots\dots 2.21$$

$$\text{maka } B = \frac{\gamma + \delta}{\gamma - \delta} \dots\dots\dots 2.21$$

jadi persamaan (2.16) dapat ditulis :

$$T_f = \frac{1}{2\delta} \ln \frac{\gamma + \delta}{\gamma - \delta} \dots\dots\dots 2.22$$

$$B = \frac{\gamma + \delta}{\gamma - \delta} \dots\dots\dots 2.23$$

dimana ;

$$\delta = \frac{1}{2T_r} \ln B \dots\dots\dots 2.24$$

$$\gamma = \frac{B+1}{B-1} \delta$$

Dari uraian diatas maka kita dapat menentukan untuk persamaan gelombang berjalan akibat surja hubung apabila diketahui waktu muka (T_r), waktu ekor (T_l) dan harga maksimumnya (E_0).

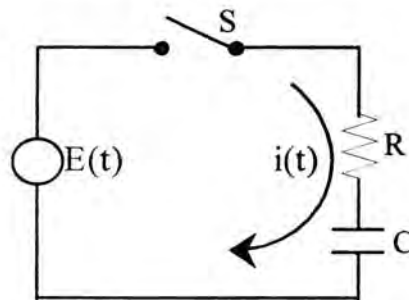
Gambar 3.3
Grafik lengkung hubungan antara k dengan B

3.5. Menentukan Persamaan Arus Peralihan (Transient) Pada Proses Switching.

Dengan bertambah tingginya tegangan yang dipakai pada sistem transmisi daya, maka surja hubung atau peristiwa yang disebabkan surja hubung lebih mempunyai peranan yang penting dari pada akibat yang disebabkan oleh impuls petir. Surja hubung adalah suatu transient tegangan yang terjadi pada waktu yang singkat. Dimana ia berasal dari pemutusan atau penyambungan dari suatu saklar tegangan tinggi atau pemutusan rangkaian, atau mungkin disebabkan gangguan pada rangkaian yang bertegangan tinggi.

Bilamana terjadi surja hubung (peristiwa switching) pada transmisi atau jala-jala listrik maka terjadilah suatu tegangan tinggi berupa impuls pada jaringan tersebut. Bersamaan dengan itu arus impuls mengalir.

3.5.1. Arus Peralihan Dengan Beban R dan C.



Gambar 3.5 Rangkaian Arus Peralihan Dengan Beban R dan C

Pada saat saklar “S” ditutup maka, berlaku persamaan hukum kirchoff.

$$e(t) = VR + VC$$

Dimana :

$$e(t) = Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t)dt$$

jika ; $e(t) = V_m \sin \omega t$

maka ; $Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = V_m \sin \omega t$

$$R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = \omega V_m \cos \omega t$$

$$\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{RC} i(t) = \frac{\omega V_m}{R} \cos \omega t \dots\dots\dots 2.25$$

karena persamaan (2.25) tidak homogen maka dicari solusi umum dan solusi homogen.

➤ Solusi Umum.

Dimana ; $i_h = c_1 i_1$

atau ; $i_1 = \Sigma^{r_1 t}$; $i_1' = r_1 \Sigma^{r_1 t} \dots\dots\dots (a)$

Substitusi nilai (a) ke (2.25)

$$\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = 0$$

$$i_1' + \frac{1}{RC} i_1 = 0$$

$$r_1 \Sigma^{r_1 t} + \frac{1}{RC} \Sigma^{r_1 t} = 0$$

$$\Sigma^{r_1 t} \left[r_1 + \frac{1}{RC} \right] = 0$$

$$r_1 + \frac{1}{RC} = 0 \Leftrightarrow r_1 = -\frac{1}{RC}$$

maka ; $i_h = c_1 i_1 = c_1 \Sigma^{r_1 t}$ atau : $i_h = c_1 \Sigma^{-\left(\frac{1}{RC}\right)t}$

➤ Solusi Partikuler(b)

$$i_p = A \cos \omega t + B \sin \omega t$$

$$i_p' = -\omega A \sin \omega t + \omega B \cos \omega t$$

Kita substitusikan nilai (b) ke (2.25) ;

$$\frac{di}{dt} + \frac{1}{Rc} i = \frac{\omega V_m}{R} \cos \omega t$$

$$i_p' + \frac{1}{Rc} i_p = \frac{\omega V_m}{R} \cos \omega t$$

$$-\omega A \sin \omega t + \omega B \cos \omega t + \frac{1}{Rc} A \cos \omega t + \frac{1}{Rc} B \sin \omega t = \frac{\omega V_m}{R} \cos \omega t$$

$$\sin \omega t \left[-\omega A + \frac{1}{Rc} B \right] + \cos \omega t \left[\frac{1}{Rc} A + \omega B \right] = \frac{\omega V_m}{R} \cos \omega t$$

Dengan cara identik :

$$\begin{array}{l} -\omega A + \frac{1}{Rc} B = 0 \\ \frac{1}{Rc} A + \omega B = \frac{\omega V_m}{R} \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} 1/Rc \\ \omega \end{array} \right| \quad \begin{array}{l} -\frac{\omega}{Rc} A + \left(\frac{1}{Rc}\right)^2 B = 0 \\ -\frac{\omega}{Rc} A + \omega^2 B = \frac{\omega^2 V_m}{R} \end{array}$$

$$\frac{-\left(\frac{1}{Rc}\right)^2 B + \omega^2 B = \frac{\omega^2 V_m}{R}}{+}$$

$$B = \frac{\omega^2 V_m}{R \left[\left(\frac{1}{Rc}\right)^2 + \omega^2 \right]}$$

$$B = \frac{\omega^2 V_m}{\frac{1}{Rc^2} + \omega^2 R} = \frac{\omega^2 V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2} = \frac{\omega^2 C^2 R V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$$

Diambil;

$$-\omega A + \frac{1}{Rc} B = 0 \Leftrightarrow A = \frac{1}{\omega Rc} B = \frac{1}{\omega Rc} \left[\frac{\omega^2 C^2 R V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \right]$$

$$A = \frac{\omega^2 C^2 R V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$$

$$i_p = a \cos \omega t + B \sin \omega t$$

$$i_p = \frac{\omega C V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2} [\cos \omega t] + \frac{\omega^2 C^2 R V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2} [\sin \omega t]$$

$$i_p = \frac{\omega C V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2} [\cos \omega t + \omega C R \sin \omega t]$$

◆ Solusi Umum

$$i(t) = i_h + i_p$$

$$i(t) = C_1 \Sigma^{-\left(\frac{1}{RC}\right)} + \frac{\omega C V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2} [\cos \omega t + \omega C R \sin \omega t] \dots\dots\dots 2.26$$

◆ Solusi Khusus (c)

$$\text{Pada saat "t" = 0 ; } i(t) = \frac{e(t)}{R} = \frac{V_m \sin \omega t}{R} \dots\dots\dots (c)$$

$$i(t) = \frac{V_m \sin \omega(0)}{R} = 0$$

Substitusi persamaan (c) ke (..)

$$0 = C_1 \Sigma^0 + \frac{\omega C V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2} [\cos 0 + \omega C R \sin 0]$$

$$C_1 = \frac{-\omega C V_m}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \dots\dots\dots (*)$$

Kita substitusikan (*) ke (2.26)

Sehingga $i(t)$ menjadi :

$$i(t) = \frac{-\omega CVm}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \Sigma^{-\left(\frac{1}{RC}\right)t} + \frac{\omega CVm}{1 + \omega^2 C^2 R^2} [\text{Cos}\omega t + \omega CR \sin \omega t]$$

$$i(t) = \frac{\omega CVm}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \left[-\Sigma^{-\left(\frac{1}{RC}\right)t} + \text{Cos}\omega t + \omega CR \sin \omega t \right]$$

BAB IV

KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK PADA PROSES SWITCHING DI JARINGAN TEGANGAN TINGGI 150 KV

4.1. Efek Gelombang Berjalan Akibat Proses Switching

Gangguan tegangan lebih pada sistem transmisi daya dan distribusi daya umumnya disebabkan oleh dua macam tegangan transient yang berasal dari luar atau dari dalam sistem itu sendiri. Tegangan lebih yang berasal dari luar menyebabkan amplitudo gelombang tegangan melebihi puncak tegangan bolak-balik yang normal. Jenis gangguan dari luar biasanya disebabkan oleh sambaran petir yang mengenai kawat atau mengenai bangunan disekitar kawat tersebut. Amplitudonya bisa mencapai 1000 KV, dan arus yang mengalir kadang-kadang melebihi 100 K.Amp. setiap sambaran petir selalu diikuti dengan merambatnya gelombang tegangan yang berjalan. Dimana amplitudonya dibatasi oleh ketahanan isolasi dari sistem transmisi tersebut.

Bila tegangan ini melebihi tegangan ketahanan sistem maka akan terjadi suatu kegagalan dari salah satu isolasinya, dan nilai tegangan selanjutnya akan sama dengan ketahanan tersebut.

Tegangan lebih yang berasal dari dalam sistem itu sendiri, terjadi karena berasal dari fenomena pemutusan hubungan (*switching fenomena*). Amplitudo gelombang ini selalu ada hubungannya dengan besar tegangan operasi dari sistem, dan bentuknya dipengaruhi oleh adanya impedansi dari sistem itu sendiri, dan juga dipengaruhi oleh keadaan pada waktu terjadinya pemutusan.

Bentuk gelombang berjalan (impuls) yang disebabkan oleh fenomena pemutusan hubungan (*switching*) dapat diwakilkan dengan persamaan gelombang eksponensial ganda.

$$E = E_0 [e^{-at} - e^{-bt}] \text{ volt (Kvoltage)}$$

Dimana a dan b adalah suatu nilai yang tetap dengan unit mikro-detik (ms). Persamaan ini menunjukkan bahwa gelombang ini merupakan gelombang yang kenaikannya cepat dan penurunannya melandai.

Proses *switching* ini menyebabkan terjadinya tegangan lebih yang ditimbulkan gelombang berjalan (impuls). Dimana amplitudo gelombang tersebut dapat mencapai tiga kali tegangan kerja sistem. sehingga pada sistem transmisi 150 KV, maka besar amplitudo maksimum dan gelombang berjalan itu untuk tiap fasa adalah : 450 KV.

4.1.1. Penganalisaan Gelombang Berjalan Pada Tegangan 150 Kv

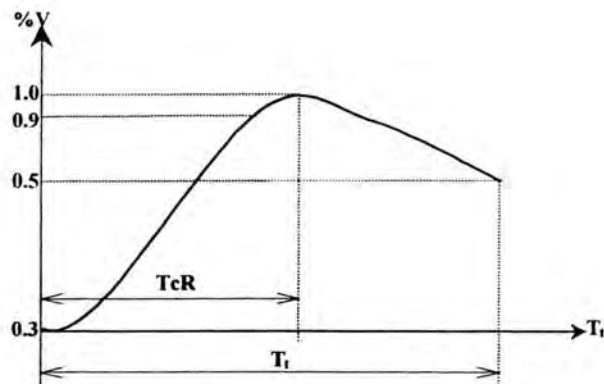
Pada gelombang impuls yang berasal dari pemutusan aliran (surja pemutusan/*switching*) penentuan waktu gelombang depan (*time to crest*) ditentukan mulai dari gelombang menaik sampai dengan titik puncak gelombang. Sedangkan gelombang ekor, waktu diteruskan sampai nilai tegangan mencapai 50% dari harga puncaknya.

Menurut standart IEC surja pemutusan ini besarnya :

$$T_{cr} = 250 \mu s \pm 20 \% \text{ sedangkan}$$

$$T_t = 2500 \mu s \pm 60\%.$$

$$E(t) = E_0 [e^{-at} - e^{-bt}]$$



gambar 4.1; Bentuk Gelombang Impuls Menurut Standart IEC

Dimana telah ditentukan dari BAB III bahwa ;

$$k = \frac{T_t}{T_f} \quad \text{dan} \quad B = \frac{b}{a}$$

dimana :

$$a = \gamma - \delta \quad \text{dan} \quad b = \gamma + \delta \quad (\text{pada persamaan 2.20 dan 2.21})$$

$$\delta = \frac{1}{2T_f} \ln \beta \quad (\text{pada persamaan 2.24})$$

$$\gamma = \frac{B+1}{B-1} \delta$$

Dan telah ditentukan (sesuai standart IEC) ;

$$T_{cr} = 250 \mu s \quad \text{dan} \quad T_t = 2500 \mu s$$

Dan besar amplitudo tegangan maksimum (E_{maks}) = 450 KV.

maka persamaan akibat gelombang berjalan dapat dicari :

$$k = \frac{2500}{250} = 10$$

Bila dilihat dari lengkung hubungan antara k dan β diperoleh bahwa untuk $k = 10$,

maka besar $\ln \beta = 3,8$ dimana ; $\beta = 45$.

$$\delta = \frac{1}{2T_f} \ln \beta = \frac{1}{2(250 \cdot 10^{-6})} \times 3,8 = 7600$$

$$\gamma = \frac{B+1}{B-1} \delta = \frac{45+1}{45-1} \times 7600 = 7945$$

sehingga diperoleh ;

$$a = \gamma - \delta = 7945 - 7600 = 345$$

dan ;

$$b = 7945 + 7600 = 15545$$

$$E(t) = E_0 \left[e^{-345t} - e^{-15545t} \right]$$

untuk memperoleh besar nilai E_0 maka ditentukan bahwa harga E_{max} terjadi pada saat;

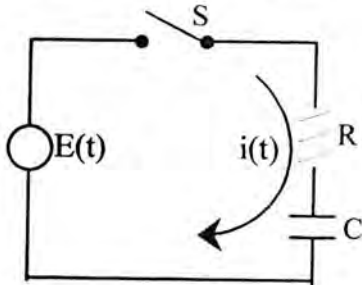
$$t = T_f = 250 \mu s$$

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{E_{\text{max}}}{\left(e^{-345t} - e^{-15545t} \right)} \\ &= \frac{450000}{\left(e^{-345(250 \cdot 10^{-6})} - e^{-15545(250 \cdot 10^{-6})} \right)} \\ &= 50167 \text{ volt} \end{aligned}$$

Maka diperoleh persamaan gelombang yang dicari :

$$E(t) = 50167 (e^{-345t} - e^{-15545t})$$

4.2. Penganalisaan Arus Peralihan (*Transient*) Akibat Proses Switching.



Diumpamakan :

$$e(t) = 150 \sin \omega t$$

$$R = 2 \text{ ohm}$$

$$C = 0,1 \text{ Farad}$$

Ditanya : $i(t)$ pada saat "S" ditutup..?

Penyelesaian :

Saat "S" ditutup, berlaku hukum Kirchoff.

$$e(t) = VR + VC$$

$$e(t) = Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

$$150 \sin \omega t = 2i(t) + \frac{1}{0,1} \int i(t) dt$$

$$\text{atau ; } 2i(t) + \frac{1}{0,1} \int i(t) dt = 150 \sin \omega t$$

$$2 \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{0,1} i(t) = 150\omega \cos \omega t \quad \text{atau ;}$$

$$\frac{di(t)}{dt} + 5i(t) = 75\omega \cos \omega t \quad \dots\dots\dots 2.27$$

➤ Solusi Umum.

$$i(t) = i_h + i_p$$

❖ Solusi Homogen

$$i_h = c_1 \cdot i_1$$

$$\text{dimana ; } i_1 = \Sigma^{r_1 t} \quad ; \quad i_1' = r_1 \Sigma^{r_1 t} \dots\dots\dots (x)$$

substitusi persamaan (x) diatas ke (2.27)

$$\frac{di(t)}{dt} + 5i(t) = 0$$

$$i_1' + 5 i_1 = 0$$

$$r_1 \Sigma^{r_1 t} + 5 \Sigma^{r_1 t} = 0$$

$$\Sigma^{r_1 t} [r_1 + 5] = 0$$

$$r_1 + 5 = 0 \Rightarrow r_1 = -5$$

$$\text{Maka ; } i_h = c_1 i_1 = c_1 \Sigma^{r_1 t} = c_1 \Sigma^{-5t}$$

❖ Solusi Partikuler

$$i_p = A \text{ Cos } \omega t + B \text{ Sin } \omega t$$

$$i_p' = -\omega A \text{ Sin } \omega t + \omega B \text{ Cos } \omega t \dots\dots\dots (y)$$

persamaan (y) kita substitusikan ke persamaan (2.27)

$$\frac{di}{dt} + 5i = 75\omega \text{Cos}\omega t$$

$$i_p' + 5i_p = 75\omega \text{Cos}\omega t$$

$$\text{atau ; } -\omega A \text{ Sin } \omega t + \omega B \text{ Cos } \omega t + 5(A \text{ Cos } \omega t + B \text{ Sin } \omega t) = 75\omega \text{Cos}\omega t$$

$$\text{atau ; } \text{Sin } \omega t [-\omega A + 5B] + \text{Cos } \omega t [5A + \omega B] = 75\omega \text{Cos}\omega t$$

Cara Identik :



$$\begin{array}{rcl}
 -\omega A + 5B = 0 & 5 & -5\omega A + 25B = 0 \\
 5A + \omega B = 75\omega & \omega & \frac{5\omega A + \omega^2 B = 75\omega^2}{25B + \omega^2 B = 75\omega^2} + \\
 & & \text{atau ; } B = \frac{75\omega^2}{25 + \omega^2}
 \end{array}$$

Dimana ; $-\omega A + 5B = 0$ maka $A = \frac{5}{\omega} B$

Sehingga didapat ; $A = \frac{5}{\omega} \left[\frac{75\omega^2}{25 + \omega^2} \right] = \frac{375\omega}{25 + \omega^2}$

Kita ketahui dimana :

$$i_p = A \cos \omega t + B \sin \omega t$$

sehingga ;
$$\begin{aligned}
 i_p &= \frac{5}{\omega} \left[\frac{75\omega^2}{25 + \omega^2} \right] [\cos \omega t] + \frac{75\omega^2}{25 + \omega^2} [\sin \omega t] \\
 &= \frac{375\omega}{25 + \omega^2} [\cos \omega t] + \frac{75\omega^2}{25 + \omega^2} [\sin \omega t] \\
 &= \left[\frac{75\omega}{25 + \omega^2} \right] [5 \cos \omega t + \omega \sin \omega t]
 \end{aligned}$$

sehingga didapat arus transient $i(t)$;

dimana ; $i(t) = i_h + i_p$

atau ; $i(t) = C_i \Sigma^{-st} + \frac{75\omega}{25 + \omega^2} [5 \cos \omega t + \omega \sin \omega t] \dots\dots\dots 2.28$

➤ Solusi khusus

Pada saat $t=0$;

$$\text{Maka } i(t) = i(t) = \frac{150 \sin \omega t}{2} = 75 \sin 0 = 0 \dots\dots\dots (z)$$

Apabila persamaan (z) kita masukkan ke persamaan (2.28)

$$0 = C_1 \Sigma^0 + \frac{75\omega}{25 + \omega^2} [5 \cos 0 + \omega \sin 0]$$

$$C_1 = -\frac{375\omega}{25 + \omega^2}$$

Sehingga apabila saklar "S" ditutup, berdasarkan persamaan (2.28) maka, besar arus transient $i(t)$;

$$i(t) = -\frac{375\omega}{25 + \omega^2} \Sigma^{-5t} + \frac{75\omega}{25 + \omega^2} [5 \cos \omega t + \omega \sin t]$$

bila disederhanakan $i(t)$ menjadi ;

$$i(t) = \left[\frac{75\omega}{25 + \omega^2} \right] [-5 \Sigma^{-5t} + 5 \cos \omega t + \omega \sin \omega t] \dots\dots\dots 2.29$$

Bila kita tetapkan ; $f = 50$ Hz dan "S" ditutup pada waktu $(t) = 1$ Sekon

$$\text{Dimana } \omega = 2\pi f = 2(3,14.50) = 314 \dots\dots\dots (**)$$

Bila persamaan (**) kita masukkan ke persamaan (2.29)

$$i(t) = \left[\frac{75(314)}{25 + (314)^2} \right] [-5 \Sigma^{-5(1)} + 5 \cos(314)(1) + (314) \sin(314)(1)]$$

$$i(t) = \left[\frac{23550}{98621} \right] [-0,03 + 3,47 + (-225.9)]$$

$$i(t) = 53.12 \text{ Amper}$$

Jadi dapat dilihat pada tegangan $e(t) = 150 \sin \omega t$ dengan beban ($R = 2$ ohm dan $C = 0,1$ Farad) dan $f = 50$ Hz dan waktu penutupan saklar "S" = 1s maka, dapat kita

lihat perbandingan besar arus transient (peralihan) yang dihasilkan yaitu sebesar 53,12 Ampere.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

- Surja hubung (switching) adalah tegangan yang terjadi pada waktu yang singkat, dimana ia berasal dari pemutusan atau penyambungan dari suatu saklar tegangan tinggi atau pemutusan rangkaian, atau mungkin disebabkan oleh gangguan pada rangkaian yang bertegangan tinggi.
- Bilamana terjadi peristiwa surja hubung (peristiwa switching) pada transmisi atau jala-jala listrik maka terjadilah suatu tegangan tinggi berupa impuls pada jaringan tersebut. Bersamaan dengan itu arus impuls-pun mengalir.
- Dengan bertambah tingginya tegangan yang dipilih pada sistem transmisi daya, maka peristiwa yang disebabkan oleh surja hubung (switching) mempunyai peranan yang penting untuk dipertimbangkan dari pada akibat yang disebabkan oleh impuls petir, karena hal itu mempunyai pengaruh yang cukup besar pada kestabilan sistem dan peralatan sistem.
- Tegangan transient yang diakibatkan proses switching ini mungkin saja dapat berbentuk gelombang bolak-balik atau oscilasi yang diredam dengan frekuensi yang tinggi antara Hz sampai KHz. Dan gelombang yang dihasilkan ini dinamakan gelombang impuls yang diperlambat.
- Besarnya amplitudo gelombang yang dihasilkan proses switching ini dapat mencapai 3x tegangan kerja sistem (tegangan operasi). Amplitudo

gelombang ini dipengaruhi oleh adanya impedansi dari sistem itu sendiri, dan juga dipengaruhi oleh keadaan pada waktu terjadinya pemutusan.

SARAN :

- ❖ Dikarenakan penyebab tegangan lebih transient ini adalah proses switching, maka salah satu cara penanggulangannya yang sederhana adalah : dengan melakukan pemilihan pemutus daya (CB) dengan syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu pemutus daya, yaitu :
 - Dapat memutus dengan kecepatan tinggi, sehingga proses timbulnya busur api dapat diperkecil yang akhirnya tegangan lebih transient-pun dapat ditekan.
- ❖ Disarankan untuk memadamkan busur api, perlu dilakukan usaha-usaha yang dapat menimbulkan proses deionisasi, dimana proses deionisasi adalah jika suatu elektron bebas bergabung dengan suatu ion positif maka akan dihasilkan suatu molekul netral.

Usaha tersebut antara lain :
 - Meniupkan udara ke sela kontak, sehingga partikel-partikel penyebab busur api dapat dijauhkan dari sela kontak.
 - Menyemburkan minyak isolasi ke busur api untuk memberi peluang yang cukup besar bagi proses rekombinasi (pengurangan partikel penyebab timbulnya busur api)

- Memotong busur api dengan tabir isolasi atau tabir logam, sehingga memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Abduh Samsir, 2001, **“Teknik Tegangan Tinggi”**, Edisi I, Salemba Teknika, Jakarta.
2. Arismunandar, A, **“Teknik Tegangan Tinggi”**, Jilid II, Pradya Paramita, Jakarta.
3. Arismunandar, A, **“Teknik Tegangan Tinggi”**, Jilid III, Pradya Paramita, Jakarta.
4. **“Pemutus Tenaga (PMT)”**, Pusdiklat PLN.
5. Hutauruk, T.S, 1989, **“Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja”**, Erlangga, Jakarta.
6. Sulasno, 1993, **“Analisa Sistem Tenaga Listrik”**, Satya Wacana, Semarang.
7. Stevenson, William D, 1994, **“Analisa Sistem Tenaga Listrik”**, Edisi IV, Erlangga, Jakarta.
8. Van Valkeburg, ME., 1994, **“Analisis Jaringan Listrik”**, Edisi III, Erlangga, Jakarta.