

METODE UNTUK MENGURANGI PUNCAK ARUS IN RUSH DAN FREKUENSI TRANSIENT KAPASITOR YANG DIPASANG PARALEL PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Yanu Prapto Sudarmojo

Staff pengajar Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana
Kampus Bukit Jimbaran Bali, 80361
Email : yanu.prapto@ee.unud.ac.id

Intisari

Penggunaan kapasitor pada sistem tenaga listrik adalah untuk memperbaiki faktor daya. Kapasitor dapat dipasang secara seri maupun secara paralel. Bila dua atau lebih kapasitor yang dipasang paralel pada suatu sistem tenaga listrik dihubungkan dengan sebuah sumber tegangan, *back-to back switching* dari kapasitor dapat menghasilkan harga puncak *arus in rush transient* yang cukup tinggi. Puncak *arus in rush transient* yang cukup tinggi ini dapat merusak peralatan kontrol pada *substation* serta dapat juga memperpendek umur kapasitor itu sendiri. Untuk itu diperlukan cara untuk mengurangi puncak *arus in rush transient*. Salah satu caranya adalah menggunakan metode berdasarkan *ANSI/IEEE C37.012.1979*.

Hasil analisis yang dilakukan pada kapasitor bank dengan tegangan sistem 145 kV dan frekuensi sistem 60 Hz, *back-to back switching* dari kapasitor menghasilkan puncak *arus in rush transient* sebesar 16.148 A dan frekuensi *transient* sebesar 17,14 KHz. Harga ini lebih besar dibandingkan dengan harga menurut standard *ANSI/IEEE C37.012.1979* sebesar 10 kA untuk puncak *arus in rush transient* dan 5300 Hz untuk frekuensi *transient*.

Untuk mengurangi puncak *arus in rush* dan frekuensi *transient* tersebut, *ANSI/IEEE C37.012.1979* mensyaratkan untuk menambahkan induktansi sebesar 1 % dari induktansi sistem (500 μ H) diantara kapasitor. Dengan menambahkan induktansi sebesar 500 μ H diantara kapasitor diperoleh hasil puncak *arus in rush transient* sebesar 4903.18 A dan frekuensi *transient* sebesar 5,17 KHz, dimana harga ini lebih kecil dari standard *ANSI/IEEE C37.012.1979*, sehingga tidak membahayakan pada sistem tenaga listrik.

Kata kunci : Kapasitor, arus in rush transient, frekuensi transient, sub station, back-to back switching

1. PENDAHULUAN

Penggunaan kapasitor pada Sistem Tenaga Listrik adalah untuk memperbaiki faktor daya. Kapasitor pada sistem tenaga listrik dapat dipasang secara seri atau secara paralel. Bila dua atau lebih kapasitor bank dihubungkan dengan sumber tegangan, maka *back-to back switching* akan menghasilkan harga puncak *arus in rush* dan frekuensi *transient* yang cukup besar. Setiap perubahan baik untuk menghidupkan atau mematikan kapasitor akan disertai dengan fluktuasi yang singkat pada sistem tenaga yang dapat menyebabkan kerusakan yang cukup parah pada sistem listrik.

Kerusakan tersebut meliputi kegagalan peralatan kontrol, gangguan elektro-magnetis dan "ground potensial" yang tinggi. Untuk dapat mengatasi kerusakan peralatan terhadap harga puncak *arus in rush transient* tersebut, diperlukan metode untuk mengurangi harga puncak *arus in rush* dan frekuensi *transient*.

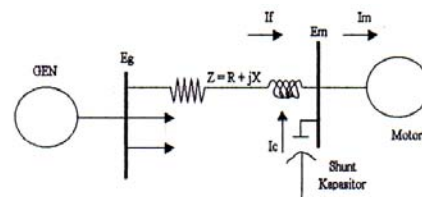
Salah satu metode untuk mengurangi harga puncak *arus in rush* dan frekuensi *transient*, adalah menggunakan metode berdasarkan *ANSI/IEEE C37.012.1979*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kapasitor Paralel (Shunt).

Sesuai dengan namanya kapasitor paralel (shunt) adalah kapasitor yang dipasang sejajar atau paralel terhadap jaringan tenaga listrik. Pemasangan kapasitor paralel akan mengakibatkan berbagai pengaruh terhadap sistem tenaga listrik.

Fungsi dari kapasitor paralel (shunt) yang tersedia dalam bentuk tunggal unit maupun dalam bentuk group adalah sebagai pensuply kilovars dengan faktor daya tertinggal (lagging) kepada suatu sistem dimana kapasitor tersebut dihubungkan. Contoh penempatan kapasitor pada suatu sistem dapat dilihat pada gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Pemasangan Kapasitor Shunt

Kapasitor paralel (shunt) yang dipasang pada ujung beban dari sirkuit mensuply beban dengan faktor daya tertinggal (lagging), mempunyai beberapa efek, yaitu :

- mengurangi komponen rangkaian arus yang tertinggal
- menaikkan level tegangan pada beban
- memperbaiki regulasi tegangan
- mengurangi rugi $I^2 R$ karena pada sistem terjadi pengurangan arus
- mengurangi rugi $I^2 X$ kilovar karena pada sistem terjadi pengurangan arus
- meningkatkan faktor daya dari sumber generator

Kapasitor paralel (shunt) mempengaruhi semua peralatan listrik dan rangkaian pada sisi sumber dimana kapasitor tersebut dipasang. Jika kapasitas kapasitornya kecil, misalnya 10 % dari rating rangkaian, ini sudah cukup untuk membuat suatu analisis pada sebuah rangkaian termasuk aplikasinya.

Dalam menentukan jumlah KVAR dari kapasitor, terlebih dahulu harus diketahui bahwa kenaikan tegangan akan menyebabkan kenaikan KVAR dengan faktor daya tertinggal (lagging) dalam arus eksitasi pada motor maupun transformator.

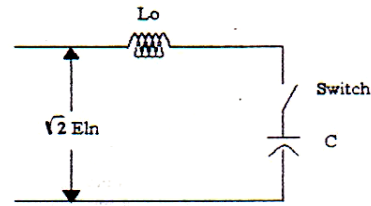
Kapasitor paralel (shunt) tersedia dalam group mulai dari satu unit kapasitor 15 KVAR sampai kapasitor yang besar dengan kapasitas 20.000 KVAR. Untuk rangkaian distribusi umumnya digunakan kapasitor dengan kapasitas 45 KVAR sampai 360 KVAR. Sedangkan kapasitor dengan kapasitas 520 KVAR sampai 3000 KVAR biasanya digunakan pada saluran distribusi ukuran sedang dan untuk saluran distribusi ukuran yang besar digunakan kapasitor baik dengan kapasitas 5000, 10.000, 15.000 KVAR. Umumnya untuk rating tegangan mulai 2400 Volt sampai 46 KV.

2.2. Arus In Rush. Transient Pada Kapasitor

Ketika sebuah susunan kapasitor (kapasitor bank) dihubungkan pada sebuah sumber tegangan, maka arus *transient* akan mengalir ke kapasitor tersebut. Arus inilah yang disebut sebagai arus *in rush*. Besar dan frekuensi dari arus *in rush* tergantung dari kapasitansi dan induktansi dari rangkaian suatu sistem. Didalam perhitungan biasanya menggunakan harga puncak (crest value) dari sumber tegangan.

2.2.1. Kapasitor Tunggal (isolated)

Contoh permasalahan yang sederhana dari sebuah kapasitor tunggal ditunjukkan pada gambar



Gambar 2. Rangkaian Dasar Kapasitor

$$I_{pk} = I_0 \left(1 + \sqrt{\frac{\text{short.circuitKVA}}{\text{capasitorKVAR}}} \right) \text{ A} \tag{1}$$

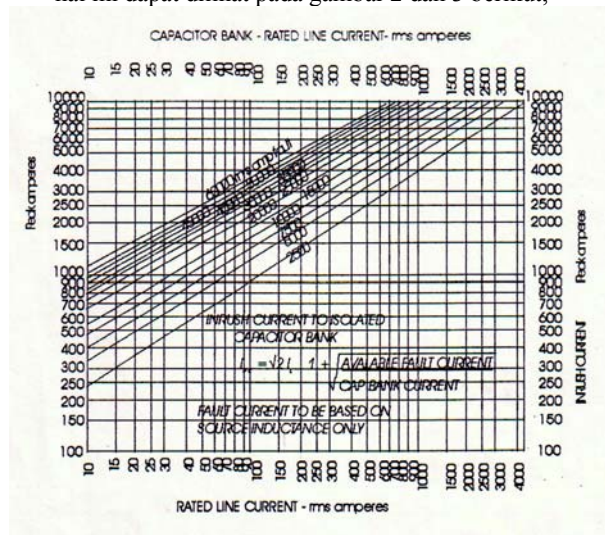
$$F_r = F_0 \left(1 + \sqrt{\frac{\text{short.circuitKVA}}{\text{capasitorKVAE}}} \right) \text{ A} \tag{2}$$

dimana :

- I_0 = harga puncak (crest value) arus pada keadaan steady state
- F_0 = frekuensi sumber tegangan

Short circuit KVA adalah KVA *fault* yang terjadi pada terminal kapasitor dan hanya tergantung dari nilai *induktif* dari sistem. KVA dan KVAR bisa dalam bentuk tiga phasa, dalam perhitungannya nanti akan mendapatkan hasil yang sama.

Berdasarkan pengalaman bahwa arus *in rush* yang terjadi dapat mencapai lima sampai lima belas kali dari arus nominal kapasitor. Untuk membuktikan hal ini dapat dilihat pada gambar 2 dan 3 berikut,

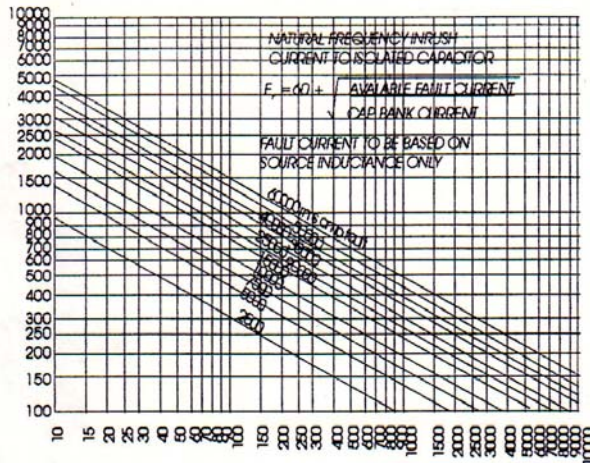


Gambar 3. Kurva Arus In Rush pada Kapasitor Terisolasi

Gambar 2. menunjukkan puncak arus *in rush* yang terjadi pada kapasitor tunggal (isolated) jika arus gangguan dan rating arus *line* dari kapasitor bank diketahui. Untuk menggunakan kurva ini konversikan kva gangguan sistem ke rms ampere. Rumus untuk

menentukan arus *in rush* pada kapasitor tunggal (isolated) adalah :

$$I_{pk} = \sqrt{2}I_0 \left(1 + \sqrt{\frac{\text{Available.fault.current}}{\text{capasitor.current}}} \right) \text{ A} \quad (3)$$



Yang perlu diperhatikan adalah bahwa induktansi, L_0 , adalah induktansi total, dalam mikrohenry, pada terminal sebuah kapasitor ke kapasitor lainnya. (Dalam hal ini sudah termasuk induktansi saluran, switch dan reaktor jika ada). Untuk menentukan nilai L_0 dapat dilihat pada tabel berikut,

Tabel 1. Nilai Induktansi L_0

| | |
|---|---|
| 1/C over head line | 0.33 $\mu\text{h}/\text{ft}^*$ |
| 3/C cabel | 0.09 $\mu\text{h}/\text{ft}^*$ |
| 15 kV, 200 A, 1 phasa oil switch Type NR. | 0.8 μh |
| 15 kV, 400 A, 3 phasa oil switch Type VR | 1.2 μh |
| Oil or air circuit breakers ...contant manufacturer | Characteristic inductance of blok bank 1.0 $\mu\text{h}/\text{ft}^{**}$ |
| Vacum switch | Neglible |

* Asumsi jarak srandar, tidak tergantung ukuran
 ** Tergantung dengan ukuran

Bila sumber tegangan adalah sumber tegangan 3 phasa dan tegangannya *line to line*, maka untuk mencari arus *in rush transient* nya adalah :

$$I_{pk} = \frac{1020\sqrt{KVAR}}{\sqrt{L_0}} \text{ A} \quad (14)$$

$$F_t = \frac{138V_r}{\sqrt{L_0.KVAR}} \text{ Hz} \quad (15)$$

dimana :

KVAR = total KVAR, 3 phasa per step

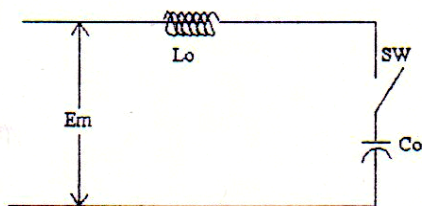
V_r = rating tegangan *line to line*

Ketika kapasitor lebih dari dua dihubungkan paralel, persamaan (5), (6), (14) dan (15) masih digunakan tetapi dimodifikasi dengan sebuah *multiflier*, F_{mp} . Besarnya nilai F_{mp} dapat dilihat pada tabel 2 berikut,

Tabel 2 Nilai Multiflier untuk N step

| No of step | Fmp | |
|------------|------|--|
| 2 | 1 | |
| 3 | 1.33 | $I_{pk}(N \text{ step}) = F_{mp} \cdot I_{pk}(2 \text{ step})$ |
| 4 | 1.5 | |
| 5 | 1.6 | |
| 6 | 1.67 | $F_t(N \text{ step}) = F_t(2 \text{ step})$ |
| - | 2 | |

Untuk mengetahui perhitungan besar dan ftekuensi arus *in rush* untuk step paralel terlebih dahulu harus diketahui rangkaian dasar berikut,



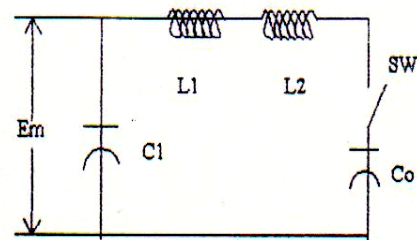
Gambar 6. Rangkaian Dasar Kapasitor Tunggal

L_0 = rangkaian induktansi total
 C_0 = capasitansi rangkaian total
 R = diabaikan

Ini telah ditunjukkan pada awal pembahasan bahwa sebuah rangkaian AC dapat ditukar sumbernya dengan DC potensial, E_m yang mana besar *magnitudenya* sama dengan nilai nominalnya (crest value) sumber AC. Hal ini akan menyebabkan harga arus *in rush* menjadi maksimum. Pada keadaan ini berlaku :

$$I_{pk} = K_1 \sqrt{\frac{C_0}{K_0}} \text{ A} \quad (16)$$

$$F_t = \frac{K_2}{\sqrt{L_0 C_0}} \text{ Hz} \quad (17)$$



Gambar 7. Rangkaian Dasar dengan dua Kapasitor Paralel

Diasumsikan bahwa kapasitor yang di "*energized*" dichange pada harga puncak (crest value) dari sumber tegangan pada yang pada saat *switch* ditutup

$$L_0 = 2L \text{ bila } L_1 = L_2 = L$$

$$L_0 = C/2 \text{ bila } C_1 = C_2 = C$$

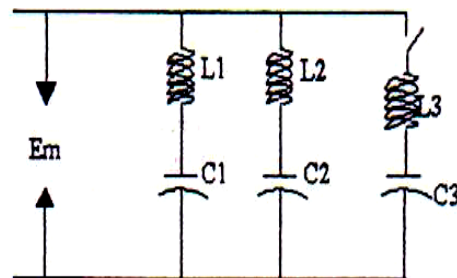
Selanjutnya :

$$I_{pk}(2) = K_1 \sqrt{\frac{C}{4L}} \text{ A} \quad (18)$$

$$F_t = \frac{K_2}{\sqrt{LC}} \text{ Hz} \quad (19)$$

Persamaan ini akan menjadi dasar untuk semua pembahasan multi step kapasitor

Berikut perhatikan 3 step pada kapasitor berikut :



Gambar 8. Rangkaian dasar tiga Kapasitor Paralel

Asumsikan bahwa : $L_1 = L_2 = L_3 = L$
 $C = C_1 = C_2 = C_3$

Maka : $L_0 = L/2 + L$
 $C_0 = 2C^2/3C = 2/3 C$

Sehingga arus dan frekuensi *in rush*,

$$I_{pk}(3) = K_1 \sqrt{(2C/3)/(2L/2)}$$

$$= K_1 \sqrt{4C/9L} \quad \text{A} \quad (20)$$

$$F_i = \frac{K_2}{\sqrt{(3L/2).(2C/3)}}$$

$$= \frac{K_2}{\sqrt{LC}} \quad \text{Hz} \quad (21)$$

Perbandingan antara $I_{pk}(3)$ dan $I_{pk}(2)$ adalah :

$$I_{pk}(3)/I_{pk}(2) = K_1 \sqrt{(4C/9L)} / K_1 \sqrt{(C/4L)}$$

$$= K_1 \sqrt{(C/4L)} = 1.33 \quad (22)$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa jika kapasitansi stepnya sama dan induktansi antara stepnya, arus *in rush* dari sistem tiga fase dapat dihitung menggunakan kapasitansi satu step dan 1,5 induktansi antara dua blok step :

$$I_{pk}(3) = I_{pk}(2).1.33$$

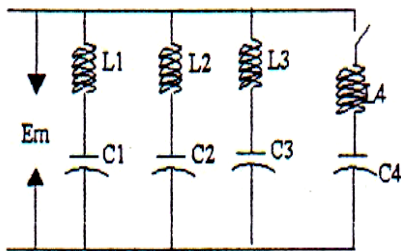
$$= K_1 C/4L \sqrt{(1.33)} \quad \text{A} \quad (23)$$

Ini juga menyatakan bahwa frekuensi natural dari tiga step bank adalah sama dengan 2 step yaitu :

$$F_i = K_1 / \sqrt{LC} \quad \text{Hz} \quad (24)$$

dimana : L dan C adalah 1.5 induktansi antara 2 blok step dan kapasitansi 1 step.

Analisis yang sama juga dapat digunakan untuk 4 step kapasitor.



Gambar 9. Rangkaian Dasar Empat Kapasitor Paralel

Asumsikan :

$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L$, maka $L_0 = L/3 + L = 4L/3$
 $C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4$, maka $C_0 = 3C/4$

Sehingga

$$I_{pk}(4) = K_1 \sqrt{(3C/4)/(4L/3)}$$

$$= K_1 \sqrt{9C/16L} \quad \text{A} \quad (25)$$

$$F_i = \frac{K_2}{\sqrt{(4L/2).(3C/4)}}$$

$$= \frac{K_2}{\sqrt{LC}} \quad \text{Hz} \quad (26)$$

Perbandingan antara $I_{pk}(4)$ dan $I_{pk}(2)$

$$I_{pk}(4)/I_{pk}(2) = K_1 \sqrt{(9C/16L)} / K_1 \sqrt{(C/4L)}$$

$$= K_1 \sqrt{(36/16)} = 1.5 \quad \text{A} \quad (27)$$

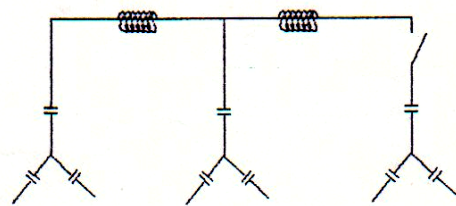
Untuk 5, 6, 7 n step adalah sama, sehingga dengan demikian diperoleh :

$$I_{pk}(n) = \frac{1770 \sqrt{KVAR}}{\sqrt{L_0}} \quad \text{A} \quad (28)$$

$$F_i = \frac{138.V_r}{\sqrt{L_0 KVAR}} \quad \text{Hz} \quad (29)$$

Dengan F_{mp} seperti pada tabel diatas tadi .

Gambar berikut adalah kapasitor yang dihubungkan secara paralel dengan kapasitor lebih dari dua.



Gambar 10. N- Kapasitor paralel

Diasumsikan bahwa semua step mempunyai ukuran dan jarak yang sama. Bila ada beberapa step yang berjauhan dari beberapa step lainnya, nilai reaktansi induktif yang digunakan didalam persamaan sebagai L_0 adalah nilai yang paling rendah.

2.3. Menentukan Arus puncak *in rush* Transient berdasarkan ANSI/IEEE. C37.012.1979.

Proses penyalakan sebuah kapasitor bank dilakukan dengan penutupan sebuah *Circuit Breaker* (CB) yang akan menghasilkan arus *in rush transient*. Besar dan frekuensi arus *in rush transient* tergantung dari parameter-parameter sebagai berikut,

- Tegangan yang digunakan
- Kapasitansi dari rangkaian
- Induktansi dalam rangkaian
- Pelepasan muatan kapasitor bank pada saat penutupan secara otomatis

2.3.1. Kapasitor Tunggal (isolated).

Apabila sebuah kapasitor dinyalakan, maka besar arus *in rush* hanya dibatasi oleh induktansi sumber dan kapasitansi kapasitor yang sedang dinyalakan tersebut.

Arus *in rush transient* pada kapasitor tunggal (isolated) lebih kecil dibandingkan dengan arus hubung singkat pada terminal-terminal kapasitor bank.

$$I_{maks} PK \approx 1.41 \sqrt{(I_{sc})(I_1)} \quad \text{(A)} \quad (30)$$

$$f \approx f_s \sqrt{\frac{(I_{sc})}{(I_1)}} \quad \text{(Hz)} \quad (31)$$

dimana :

I_{maks}^{PK} = puncak maksimum dari arus *in rush* transient

f = frekuensi arus *in rush transient*

f_s = frekuensi sistem dalam hz

I_1 = arus rms maksimum dari kapasitor bank yang *energized*

$$I_{SC} = \frac{1532(E_{LL})}{(L_{EQ})} \text{ untuk } f_s = 60 \text{ Hz}$$

L_{EQ} = jumlah total induktansi sistem pada kapasitor bank yang *energized* (μH)

$$L_{EQ} = \frac{X_L}{377} \text{ untuk } f_s = 60 \text{ Hz}$$

X_L = jumlah total induktansi sistem pada kapasitor bank yang *energized* ($\mu\Omega$)

2.3.2. Back-to-back Kapasitor

$$I_{maks}^{PK} \approx 1747 \sqrt{\frac{(V_{LL})(I_1)(I_2 + I_3 + \dots + I_n)}{(L_{EQ})(I_1 + I_2 + \dots + I_n)}} \quad (A) \quad (32)$$

$$f \approx 9.5 \sqrt{\frac{(f_s)(V_{LL})(I_1 + I_2 + \dots + I_n)}{(L_{EQ})(I_1 + I_2 + \dots + I_n)}} \quad (\text{kHz}) \quad (33)$$

dimana :

V_{LL} = rating tegangan rms fasa-fasa maksimum (KV)

$I_{2\dots n}$ = arus rms maksimum dari kapasitor bank yang *energized*

Arus rms kapasitor maksimum ditentukan dengan mengalikan arus nominal kapasitor dengan tiga faktor yaitu : perbandingan tegangan, toleransi kapasitor dan komponen-komponen harmonisa. Perbandingan tegangan ditentukan dengan membagi harga rata-rata tegangan sistem maksimum dengan tegangan kapasitor bank yang tertera (biasanya sama dengan tegangan nominal sistem. Toleransi kapasitor positif diasumsikan

10 % dan komponen-komponen harmonisa sebesar 10 % untuk kapasitor bank yang ditanahkan dan 5 % untuk kapasitor bank yang tidak ditanahkan.

Induktansidapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut,

$$L = 0.1404 \log_{10} \frac{GMD}{GMR} \quad (\mu\text{H/dtk}) \quad (34)$$

$$GMD = \sqrt[3]{(d_{ab})(d_{bc})(d_{ca})} \quad (35)$$

dimana :

GMD = geometric mean distance

GMR = geometric mean radius

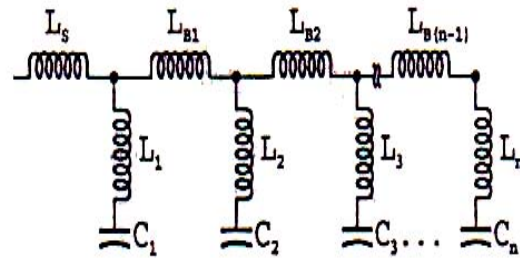
d_{ab}, d_{bc}, d_{ca} = jarak tengah antara fasa

Nilai GMR umumnya diberikan dalam bentuk tabel untuk konduktor yang bersangkutan baik tembaga maupun aluminium dengan jarak simetris mendatar yang menghubungkan kapasitor bank.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN.

3.1 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah : data yang diperoleh dari Larry M. Smith, July/August, 1995. A Practical Approach in Substation Capacitor Bank Application to Calculating, Limiting and Reducing the Effect of Transient Currents, IEEE dengan konfigurasi susunan kapasitor seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut,



$V_{LL} = 145 \text{ kV}$

$E_{LL} = 138.000 \text{ V}$

$F_s = 60 \text{ Hz}$

$L_s = 50.000 \mu\text{H}$ ($X_L = 18.85 \Omega$)

$L_1, L_2, L_3 = 23 \mu\text{H}$

$L_{B1}, L_{B2} = 13 \mu\text{H}$

$C_1, C_2, C_3 = 10 \text{ Mvar}$ ditanahkan dengan sistem bintang

3.2. Menentukan harga puncak arus in rush dan frekuensi transient

1. Keadaan pertama adalah *isolated*, dimana hanya kapasitor C_1 saja yang bekerja

$$L_{EQ1} = L_1 + L_2 = (50.000 + 23) \mu\text{H} = 50.023 \mu\text{H}$$

$$I_{SC} = \frac{E_{LL}}{L_{Eq} \sqrt{3.2\pi f}} = 4.226 \text{ A}$$

$$I_1 = (41.84)(1.1)(1.1) = 53.16 \text{ A}$$

$$I_{maks} (PK)_1 = 1.41 \sqrt{(4.226)(53.16)} = 668.3 \text{ A}$$

$$f = F_s \sqrt{\frac{(I_{SC})}{(I_1)}} = 60 \sqrt{\frac{4.226}{53.16}} = 535 \text{ Hz}$$

2. Keadaan kedua adalah *back-to-back*, dimana kapasitor C_2 bekerja sementara kapasitor C_1 masih bekerja

$$L_{EQ2} = L_1 + L_{B1} + L_2 = (23+13+23) \mu\text{H} = 59 \mu\text{H}$$

$$I_2 = I_1 = 53.16 \text{ A}$$

$$I_{maks} (PK)_2 = 1747 \sqrt{\frac{(V_{LL})(I_1)(I_2)}{(L_{EQ})(I_1)}}$$

$$I_{maks} (PK)_2 = 1747 \sqrt{\frac{(145.000)(53.16)(53.16)}{(59)(53.16)}} \text{ A} = 14.124 \text{ A}$$

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{(f_s)(V_{LL})(I_1)}{(L_{EQ})(I_1)(I_2)}} \text{ KHz}$$

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{(60)(145.000)(53.16)}{(59)(53.16)(53.16)}} \text{ KHz}$$

$$= 22.4 \text{ KHz}$$

3. Keadaan ketiga adalah *back-to-back*, dimana kapasitor C_3 bekerja sementara kapasitor C_2 dan C_1 masih bekerja

$$L_{EQ3} = [(L_1 + L_2 + L_{B1})/2] + L_3 + L_{B1} = 65.5 \mu\text{H}$$

$$I_3 = I_2 = I_1 = 53.16\text{A}$$

$$I_{maks}(PK)_3 \approx 1747 \sqrt{\frac{(V_{LL})(I_1)(I_2 + I_3 + I_4)}{(L_{EQ})(I_1 + I_2 + I_3)}}$$

$$= 1747 \sqrt{\frac{(145.000)(53.16)(53.16 + 53.16 + 53.16)}{(65.5)(53.16 + 53.16 + 53.16)}} \text{ A}$$

$$= 15.474 \text{ A}$$

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{(f_s)(V_{LL})(I_1 + I_2)}{(L_{EQ})(I_1)(I_2 + I_3)}} \text{ KHz}$$

$$= 9.5 \sqrt{\frac{(60)(145.000)(53.16 + 53.16)}{(65.5)(53.16)(53.16 + 53.16)}} \text{ KHz}$$

$$= 18.4 \text{ KHz}$$

4. Keadaan keempat adalah *back-to-back*, dimana kapasitor C_4 bekerja sementara kapasitor C_3 , C_2 dan C_1 masih bekerja

$$L_{EQ4} = [(L_1 + L_2 + L_3 + L_{B1}L_{B2})/3] + L_4 + L_{B2} \mu\text{H}$$

$$= 67.66 \mu\text{H}$$

$$I_3 = I_2 = I_1 = 53.16\text{A}$$

$$I_{maks}(PK)_3 = 1747 \sqrt{\frac{(V_{LL})(I_1)(I_2 + I_3 + I_4 + I_5)}{(L_{EQ})(I_1 + I_2 + I_3 + I_4)}}$$

$$= 1747 \sqrt{\frac{(145.000)(53.16)(53.16 + 53.16 + 53.16 + 53.16)}{(67.66)(53.16 + 53.16 + 53.16 + 53.16)}} \text{ A}$$

$$= 16.148 \text{ A}$$

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{(f_s)(V_{LL})(I_1 + I_2 + I_3)}{(L_{EQ})(I_1)(I_2 + I_3 + I_4)}}$$

$$= 9.5 \sqrt{\frac{(60)(145.000)(53.16 + 53.16 + 53.16)}{(67.66)(53.16 + 53.16 + 53.16)}} \text{ KHz}$$

$$= 17.14 \text{ KHz}$$

Berdasarkan ANSI/IEEE C37.012.1979 untuk tegangan sistem 145 kV, harga puncak maksimum dari arus dan frekuensi *in rush transient* untuk keadaan *back-to-back* adalah 10 kA dan 5.300 Hz. Jadi harga puncak maksimum dari arus dan frekuensi *in rush transient* untuk keadaan *back-to-back* hasil perhitungan lebih besar dibandingkan ANSI/IEEE C37.012.1979.

3.3. Mengurangi puncak arus in rush dan frekuensi transient pada kapasitor berdasarkan ANSI/IEEE C37.012.1979

Untuk mengurangi puncak maksimum dari arus *in rush* dan frekuensi *transient* perlu dilakukan penambahan nilai induktansi antara kapasitor berdasarkan ANSI/IEEE C37.012.1979 sebesar 1 % dari nilai induktansi sumber.

Nilai induktansi sumber adalah 50.000 μH , maka nilai induktansi yang harus ditambahkan diantara kapasitor untuk membatasi puncak maksimum dari arus dan frekuensi *in rush transient* adalah sebesar 500 μH .

1. Keadaan pertama adalah *isolated*, dimana hanya kapasitor C_1 saja yang bekerja

$$L_{EQ1} = L_1 + L_2 = (50.000 + 23) \mu\text{H} = 50.023 \mu\text{H}$$

$$I_{SC} = \frac{E_{LL}}{L_{Eq} \sqrt{3.2\pi f}} = 4.226 \text{ A}$$

$$I_1 = (41.84)(1.1)(1.1) = 53.16 \text{ A}$$

$$I_{maks}(PK)_1 = 1.41 \sqrt{(4.226)(53.16)} = 668.3 \text{ A}$$

$$f = F_s \sqrt{\frac{I_{SC}}{I_1}} = 60 \sqrt{\frac{4.226}{53.16}} = 535 \text{ Hz}$$

2. Keadaan kedua adalah *back-to-back*, dimana kapasitor C_2 bekerja sementara kapasitor C_1 masih bekerja

$$L_{EQ2} = L_1 + L_{B1} + L_2 = (500 + 23 + 13 + 23) \mu\text{H}$$

$$= 559 \mu\text{H}$$

$$I_2 = I_1 = 53.16 \text{ A}$$

$$I_{maks}(PK)_2 = 1747 \sqrt{\frac{(V_{LL})(I_1)(I_2)}{(L_{EQ})(I_1)}} \text{ A}$$

$$I_{maks}(PK)_2 = 1747 \sqrt{\frac{(145.000)(53.16)(53.16)}{(559)(53.16)}}$$

$$= 5063.75 \text{ A}$$

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{(f_s)(V_{LL})(I_1)}{(L_{EQ})(I_1)(I_2)}} \text{ KHz}$$

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{(60)(145.000)(53.16)}{(559)(53.16)(53.16)}} = 8.02 \text{ A}$$

3. Keadaan ketiga adalah *back-to-back*, kapasitor C_3 bekerja sementara kapasitor C_2 dan C_1 masih bekerja

$$L_{EQ3} = [(L_1 + L_2 + L_{B1})/2] + L_3 + L_{B1} = 765.5 \mu\text{H}$$

$$I_3 = I_2 = I_1 = 53.16 \text{ A}$$

$$I_{maks}(PK)_3 \approx 1747 \sqrt{\frac{(V_{LL})(I_1)(I_2 + I_3 + I_4)}{(L_{EQ})(I_1 + I_2 + I_3)}}$$

$$= 1747 \sqrt{\frac{(145000)(53.16)(53.16 + 53.16 + 53.16)}{(765.5)(53.16 + 53.16 + 53.16)}}$$

$$= 4855.96 \text{ A}$$

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{(f_s)(V_{LL})(I_1 + I_2)}{(L_{EQ})(I_1)(I_2 + I_3)}} \text{ KHz}$$

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{(60)(145.000)(53.16 + 53.16)}{(765.5)(53.16)(53.16 + 53.16)}}$$

$$= 5.76 \text{ KHz}$$

4. Keadaan keempat adalah *back-to-back*, dimana kapasitor C_4 bekerja sementara kapasitor C_3 , C_2 dan C_1 masih bekerja

$$L_{EQ4} = [(L_1 + L_2 + L_3 + L_{B1}L_{B2})/3] + L_4 + L_{B2}$$

$$= 834.333 \mu\text{H}$$

$$I_3 = I_2 = I_1 = 53.16 \text{ A}$$

$$I_{maks}(PK)_3 \approx 1747 \sqrt{\frac{(V_{LL})(I_1)(I_2 + I_3 + I_4 + I_5)}{(L_{EQ})(I_1 + I_2 + I_3 + I_4)}}$$

$$= 1747 \sqrt{\frac{(145.000)(53.16)(53.16 + 53.16 + 53.16 + 53.16)}{(834.333)(53.16 + 53.16 + 53.16 + 53.16)}}$$

$$= 4903.18 \text{ A}$$

$$f \approx 9.5 \sqrt{\frac{(f_s)(V_{LL})(I_1 + I_2 + I_3)}{(L_{EQ})(I_1)(I_2 + I_3 + I_4)}}$$

$$= 9.5 \sqrt{\frac{(60)(145.000)(53.16 + 53.16 + 53.16)}{(834.333)(53.16)(53.16 + 53.16 + 53.16)}}$$

$$= 5.17 \text{ KHz}$$

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut,

1. Harga puncak maksimum dari arus *in rush* dan frekuensi *transient* pada tegangan sistem 145.000 V untuk keadaan *back-to-back* hasil perhitungan adalah 16.148 A dan 17.14 KHz.
2. Harga ini lebih besar dari harga puncak maksimum dari arus *in rush* dan frekuensi

transient pada tegangan sistem 145.000 V untuk keadaan *back-to-back* berdasarkan ANSI/IEEE C37.012.1979 yaitu 10 kA dan 5.300 Hz.

3. Untuk mengurangi harga puncak maksimum dari arus *in rush* dan frekuensi *transient* berdasarkan ANSI/IEEE C37.012.1979 harus ditambahkan nilai induktansi antara kapasitor sebesar 1 % dari nilai induktansi sumber (dalam hal ini sebesar 500 μH).
4. Dengan penambahan nilai induktansi antara kapasitor sebesar 500 μH , diperoleh harga puncak maksimum dari arus *in rush* dan frekuensi *transient* sebesar 4903.18 A dan 5,17 Hz yang jauh lebih kecil dari yang dipersyaratkan ANSI/IEEE C37.012.1979.

5. DAFTAR PUTAKA

- [1]. ANSI Standard C 37.06, 1987. AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis-Preferred Ratings and Related Capabilities.
- [2]. ANSI/IEEE Standard C 37.012, 1979. IEEE Applications Guide for Capacitance Current Switching for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.
- [3]. Donald Beeman, 1955 New York, London, Industrial Power System Handbook, McGraw-Hill Book Company.
- [4]. Johnson A. A, New York, 1950, Electrical Transmission and Distribution Reference Book.
- [5]. Larry M. Smith, July/August, 1995. A Practical Approach in Substation Capacitor Bank Application to Calculating, Limiting and Reducing the Effect of Transient Currents, IEEE.
- [6]. Longland Ceng, London, 1984. Power Capacitor Handbook, Butterworth & Co Ltd.