

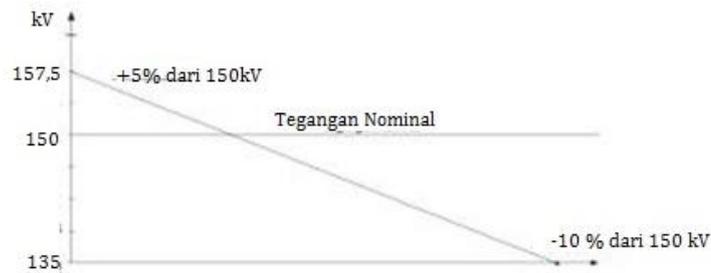
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian *Drop* Tegangan

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran *Volt*. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti. [5]

Tegangan jatuh secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Tegangan jatuh ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Tegangan jatuh V pada penghantar semakin besar jika arus I di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar R_{ℓ} semakin besar pula. Tegangan jatuh merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada di bawah tegangan nominal yang dibutuhkan. [6]



Gambar 2. 1 Toleransi tegangan pelayanan yang diijinkan

Sesuai dengan standar tegangan yang ditentukan oleh Permen ESDM No. 03 Tahun 2007 dan PLN (SPLN), perancangan jaringan dibuat agar jatuh tegangan di ujung diterima 10%. Tegangan jatuh pada jaringan disebabkan adanya rugi tegangan akibat hambatan listrik (R) dan reaktansi (X).

2.2 Penyebab *Drop* Tegangan

Penurunan tegangan tersebut tergantung pada dua hal, yaitu : [7]

1. Aliran arus melalui kabel - semakin tinggi arus, semakin besar tegangan *drop*.
2. Impedansi konduktor - semakin besar impedansi, semakin besar tegangan *drop*.

Impedansi kabel merupakan fungsi dari ukuran kabel (luas penampang) dan panjang kabel. Umumnya produsen kabel akan melampirkan data kabel yang diproduksinya seperti nilai resistansi kabel dan reaktansi kabel dalam satuan Ω / km .

Jatuh tegangan phasor V_d pada suatu penghantar yang mempunyai impedansi (Z) dan membawa arus (I) dapat dijabarkan dengan rumus : [6]

$$V_d = I \cdot Z \quad (2.1)$$

Dalam pembahasan ini yang dimaksudkan dengan jatuh tegangan (ΔV) adalah selisih antara tegangan kirim (V_k) dengan tegangan terima (V_T), maka jatuh tegangan dapat didefinisikan adalah :

$$\Delta V = (V_k) - (V_T) \quad (2.2)$$

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Tegangan jatuh relatif dinamakan regulasi tegangan VR (*voltage regulation*) dan dinyatakan oleh rumus :

$$V_R = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \quad (2.3)$$

Dimana :

V_s = tegangan pada pangkal pengiriman

V_r = tegangan pada ujung penerimaan

Untuk menghitung jatuh tegangan, diperhitungkan reaktansinya, maupun faktor dayanya yang tidak sama dengan satu, maka berikut ini akan diuraikan cara perhitungannya. Dalam penyederhanaan perhitungan, diasumsikan beban-bebannya merupakan beban fasa tiga yang seimbang dan faktor dayanya ($\cos \phi$) antara 0,6 s/d 0,85. tegangan dapat dihitung berdasarkan rumus pendekatan hubungan sebagai berikut :

$$(\Delta V) = I (R . \cos \varphi + X . \sin \varphi) L \quad (2.4)$$

Dimana :

I = Arus beban (Ampere)

R = Tahanan rangkaian (Ohm)

X = Reaktansi rangkaian (Ohm)

L = Panjang penghantar (m)

2.3 Memperbaiki Nilai Tegangan

Dari penjelasan penyebab *drop* tegangan ada beberapa metode untuk memperbaiki tegangan, sebagai berikut : [7]

1. Menekan timbulnya rugi daya dengan mengubah ukuran penghantar ke ukuran yang lebih besar dan pemilihan konduktor dengan tahanan yang kecil.
2. Memperbaiki faktor daya dengan cara penambahan kapasitor bank.

Dengan metode tersebut, nilai rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan listrik dapat direduksi.

2.3.1 Perbaikan Faktor Daya

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan Watt. Terdapat tiga macam daya yaitu :

1. Daya aktif (P) adalah daya yang terpakai untuk melakukan usaha atau energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah watt.

$$P = V I \cos \phi \quad (2.5)$$

2. Daya reaktif (Q) adalah daya yang di suplai oleh komponen reaktif. Satuan daya reaktif adalah VAR.

$$Q = V I \sin \phi \quad (2.6)$$

3. Daya nyata (S) adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan rms (V_{rms}) dan arus rms (I_{rms}) dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri antara daya aktif dan daya reaktif. Satuan daya nyata adalah VA.

$$S = V I \quad (2.7)$$

Dinotasikan sebagai $\cos \phi$ yaitu perbandingan antara arus yang dapat menghasilkan kerja didalam suatu rangkaian terhadap arus total yang masuk ke dalam rangkaian atau dapat dikatakan sebagai perbandingan daya aktif (kW) dan daya semu (kVA). Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut inidan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor Daya menggambarkan sudut phasa antara daya aktif dan daya semu. Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi.

Metode perbaikan faktor daya ada 2 :

1. Dengan mempertahankan nilai daya nyata nya (Watt) dan mengubah nilai daya reaktifnya (Var) sehingga daya semu (VA) yang terpakai menjadi kecil.

2. Dengan mempertahankan nilai daya semu nya (VA) dan mengubah nilai daya reaktifnya (Var) sehingga daya nyata (VA) yang terpakai menjadi kecil.

2.4 Penghantar

Penghantar adalah zat atau bahan yang mempunyai kemampuan untuk menghantarkan panas atau arus listrik. Penghantar sebagai pembawa arus pada sistem transmisi adalah komponen SUTT/ SUTET yang berfungsi dalam proses penyaluran arus listrik dari Pembangkit ke GI/ GITET atau dari GI/ GITET ke GI/ GITET lainnya. Komponen-komponen yang termasuk fungsi pembawa arus, yaitu:

2.4.1 Kawat Penghantar

Sebagai media pembawa arus pada SUTT/ SUTET dengan kapasitas arus sesuai spesifikasi atau ratingnya yang direntangkan lewat tiang-tiang SUTT/ SUTET melalui insulator-insulator sebagai penyekat konduktor dengan tiang. Pada tiang tension, konduktor dipegang oleh strain clamp/ compression dead end clamp, sedangkan pada tiang suspension dipegang oleh suspension clamp. Bahan konduktor yang dipergunakan untuk saluran energi listrik perlu memiliki sifat sifat sebagai berikut :[8]

1. Konduktivitas tinggi

Konduktivitas yang baik pada suatu bahan konduktor yaitu yang memiliki nilai hambatan jenis relatif kecil. Semakin kecil hambatan jenisnya maka semakin baik nilai konduktivitas bahan.

Besar hambatan jenis berbanding terbalik dengan konduktifitas bahan. Konduktifitas bahan berkaitan dengan daya hantar panas dan daya hantar listrik. Daya hantar panas menyatakan jumlah panas yang mampu melewati bahan dalam selang waktu tertentu. Bahan logam merupakan bahan yang memiliki daya hantar panas yang tinggi sehingga bahan logam cenderung mempunyai konduktifitas yang tinggi sebagai bahan konduktor. Daya hantar pada listrik menggambarkan kemampuan bahan konduktor dalam menghantarkan arus listrik. Besar dari daya hantar listrik konduktor adalah sangat dipengaruhi oleh besar hambatan jenis yang dimiliki oleh bahan konduktor. Hambatan jenis dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut :

$$R = \rho (l/A) \quad (2.8)$$

Keterangan :

R = hambatan (Ω)

ρ = hambatan jenis ($\Omega.m$)

l = panjang penghantar (meter)

A = luas penampang kawat (m^2)

2. Kekuatan tarik mekanik tinggi

Bahan konduktor mempunyai kekuatan mekanis yang tinggi sehingga dapat menghantarkan panas atau listrik dengan baik. Bahan dengan kekuatan mekanis yang tinggi memiliki partikel penyusun rapat. Ketika bahan konduktor didekatka dengan sumber

panas atau arus listrik, maka akan terjadi vibrasi atau getaran pada bahan konduktor. Melalui vibrasi atau getaran ini panas atau arus listrik akan mengalir dari ujung ke ujung bahan konduktor yang lainnya. Sifat mekanis bahan sangat penting terutama ketika bahan konduktor berada diatas tanah. Bahan konduktor harus diketahui sifat mekanisnya karena berhubungan dengan pendistribusian tegangan tinggi pada saluran arus listrik.

3. Koefisien muai yang rendah

Bahan yang mempunyai koefisien muai kecil tidak akan mudah berubah bentuk, ukuran atau volume akibat pengaruh dari perubahan temperatur.

$$R_2 = R_1 \{ 1 + \alpha (t_2 - t_1) \} \quad (2.9)$$

keterangan :

R_2 : besar hambatan pada t_2 (Ω)

R_1 : besar hambatan pada t_1 (Ω)

t_2 : temperatur suhu akhir, dalam C

t_1 : temperatur suhu awal, dalam C

α : koefisien temperatur tahanan nilai hambatan jenis

4. Ekonomis

Dalam pemilihan kawat konduktor mempertimbangkan aspek ekonomi dengan tetap mengedepankan kualitas keandalan sistem penyaluran transmisi.

5. Lentur/ tidak mudah patah

Sifat ini sangat penting digunakan saat terjadi pendistribusian tegangan tinggi. Dengan modulus elastisitas tinggi maka bahan konduktor tidak akan rentan mengalami kerusakan akibat tegangan tinggi

Biasanya konduktor pada SUTT/ SUTET merupakan konduktor berkas (stranded) atau serabut yang dipilin, agar mempunyai kapasitas yang lebih besar dibanding konduktor pejal dan mempermudah dalam penanganannya.

2.4.2 Jenis-Jenis Kawat Penghantar

Jenis-jenis kawat penghantar yang bisa digunakan pada saluran transmisi, antara lain :[9]

1. Konduktor Jenis Tembaga

Konduktor ini merupakan penghantar yang baik karena memiliki konduktivitas tinggi dan kekuatan mekanik yang cukup baik.

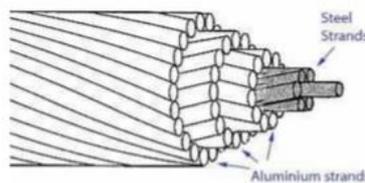
2. Konduktor Jenis Aluminium

Konduktor dengan bahan aluminium lebih ringan daripada konduktor jenis tembaga, konduktivitas dan kekuatan mekaniknya lebih rendah. Jenis-jenis konduktor aluminium antara lain :

a. Konduktor ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)

Konduktor jenis ini, bagian dalamnya berupa steel yang mempunyai kuat mekanik tinggi, sedangkan bagian luarnya berupa aluminium yang mempunyai konduktivitas tinggi. Karena

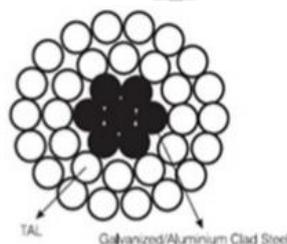
sifat elektron lebih menyukai bagian luar konduktor daripada bagian sebelah dalam konduktor, maka pada sebagian besar SUTT maupun SUTET menggunakan konduktor jenis ACSR. Untuk daerah yang udaranya mengandung kadar belerang tinggi dipakai jenis ACSR/AS, yaitu konduktor jenis ACSR yang konduktor steelnya dilapisi dengan aluminium.



Gambar 2. 2 Konduktor Jenis ACSR

b. Konduktor jenis TACSR (Thermal Aluminium Conductor Steel Reinforced)

Pada saluran transmisi yang mempunyai kapasitas penyaluran / beban sistem tinggi maka dipasang konduktor jenis TACSR. Konduktor jenis ini mempunyai kapasitas lebih besar tetapi berat konduktor tidak mengalami perubahan yang banyak, tapi berpengaruh terhadap sagging.



Gambar 2. 3 Konduktor Jenis TACSR

Tabel 2. 1 Daftar konduktor yang dipergunakan untuk SUTT/ SUTET

NO.	TYPE KONDUKTOR	JENIS KONDUKTOR	NEGARA ASAL	STANDARD YG. DIGUNAKAN	DATA KONDUKTOR				CURRENT CARRYING CAPACITY (CCC) (Amp)	KETERANGAN
					LUAS PENAMPANG (mm ²)	DIAMETER (mm)	R DC 20° C (Ohm/ Km)	BERAT (kg/ Km)		
1.	ACSR	HAWK	USA	ASTM B 232 - 84, T ASTM B 232 - 89	281,03	21,79	0,1199	466	466	150 KV
2.	ACSR	HEN	USA	ASTM B 232 - 84, T ASTM B 232 - 89	298,07	22,40	0,1202	1.112	457	150 KV
3.	ACSR	DOVE	CANADA	CSA C.49 - 1965	327,77	23,55	0,1024	1.137	495	150 KV & 500 KV
4.	ACSR	GANNET	USA	ASTM B 232 - 84, T ASTM B 232 - 89	382,84	25,76	0,0858	1.365	618	150 KV & 500 KV
5.	ACSR	ZEBRA	BRITISH	BS. 215 P.2 - 1956 BS. 215 P.2 - 1970	484,50	28,62	0,0674	1.821	835	150 KV
6.	ACSR	DRAKE	CANADA	CSA C.49 - 1965	468,45	28,11	0,0715	1.824	611	150 KV
7.	ACSR	PEGION	CANADA	CSA C.49-1965	99,22	12,75	0,3366	343	241	70 KV
8.	ACSR	OSTRICH	CANADA	CSA C.49-1965	176,71	17,28	0,1900	613	343	70 KV
9.	ACSR	LINNET	USA CANADA	ASTM B232-89 CSA C49-1965	198,19 198,26	18,31 18,31	0,1699 0,1696	689 687	371 368	70 KV 70 KV
10.	ACSR	ACSR 240/40	GERMANY	DIN 48204	282,50	21,90	0,1188	967	457	150 KV
11.	ACSR	ACSR 340/ 30	INDONESIA	SI 1134 - 1981 SPLN 41 - 7 : 1981	369,10	25	0,0851	1.180	790	150 KV
12.	THERMAL	TACSR 240	JEPANG	JEC 74 - 1964 JIS C 3110 - 1968 JEC A 234 - 1977 sda	297,80	22,40	0,112	1.024	819	150 KV
13.	THERMAL	TACSR 410	JEPANG	sda	480,80	28,50	0,0671	1.578	1.149	150 KV
14.	THERMAL	TACSR 330	JEPANG	sda	379,60	25,30	0,085	1.239	986	150 KV
15.	THERMAL	TACSR 520	JEPANG	sda	586,85	31,50	0,0588	1.962	1.304	150 KV
1.		CU	GERMANY	DIN 48201 & DIN 4313	16	4,51	-	-	140	
2.		CU	GERMANY	DIN 48201 & DIN 4313	25	5,64	-	-	180	
3.		CU	GERMANY	DIN 48201 & DIN 4313	35	6,68	-	-	220	
4.		CU	GERMANY	DIN 48201 & DIN 4313	50	7,99	-	-	280	

c. Konduktor jenis ACCC (Alumunium Conductor with Composite Core)

Konduktor jenis ini, bagian dalamnya berupa composite yang mempunyai kuat mekanik tinggi, dikarenakan tidak dari bahan konduktif, maka bahan ini tidak mengalami pemuaihan saat dibebani arus maupun tegangan. Untuk konduktor jenis ini tidak mengalami korosi cocok untuk daerah pinggir pantai, sedangkan bagian luarnya berupa aluminium yang mempunyai konduktivitas tinggi. Konduktor jenis ini dipilih karena memiliki karakteristik high conductivity & low sag conductor.



Gambar 2. 4 Bagian Bagian ACCC

Keunggulan Konduktor ACCC:

a. Daya Hantar

Konduktor ACCC dapat menyalurkan arus dua kali lipat dibanding Konduktor biasa/konvensional. Core/Inti yang lebih ringan memungkinkan penambahan luas aluminium sampai 28 % tanpa penambahan berat.

b. Mengurangi *Losses*

Pada kondisi beban sama mengurangi *losses* 30 sampai 40% dibanding konduktor dengan diameter dan berat yang sama

c. Kekuatan Berat

Hybrid Carbon Composite Core lebih kuat dan lebih ringan dari steel core/ inti baja

d. . Bentang lebih Panjang

Lebih kuat dan dimensi yang stabil memungkinkan span lebih panjang atau tower yg lebih rendah.

Tabel 2. 2 DaftarKonduktor Jenis ACCC

ACCC®	Conductor		Diameter		Core Diameter		Weight		Core Rated Strength		Conductor Rated Strength		DC @ 20°C	AC @ 25°C	AC @ 75°C	AC Ampacity	
	Size	(kcmil)	(mm²)	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(lb/ft)	(kg/km)	(lb)	(kN)	(lb)	(kN)	(ohm/km)	(ohm/km)	(ohm/km)	75°C
Drake	1020	516.8	1.108	28.14	0.375	9.53	1047	1558	34,570	153.8	41,100	182.8	0.05409	0.05640	0.06749	1,025	1,765
Dublin	1043	528.5	1.108	28.15	0.375	9.53	1072	1595	34,570	153.8	41,300	183.5	0.05300	0.05608	0.06715	1,028	1,769
Hamburg	1092	553.3	1.127	28.62	0.345	8.76	1106	1646	29,260	130.2	36,300	161.3	0.05070	0.05375	0.06436	1,054	1,816
Milan	1134	574.6	1.146	29.10	0.345	8.76	1146	1705	29,260	130.2	36,500	162.5	0.04880	0.05186	0.06210	1,078	1,859
Rome	1183	599.4	1.177	29.89	0.375	9.53	1205	1793	34,570	153.8	42,200	187.5	0.04680	0.04981	0.05965	1,108	1,913
Cardinal	1222	619.2	1.196	30.38	0.345	8.76	1228	1828	29,260	130.2	37,100	165.0	0.04535	0.04793	0.05712	1,137	1,971
Vienna	1255	635.9	1.198	30.42	0.345	8.76	1259	1873	29,260	130.2	37,300	165.9	0.04410	0.04700	0.05627	1,146	1,981
Budapest	1332	674.9	1.240	31.50	0.375	9.53	1346	2003	34,570	153.8	43,100	191.8	0.04160	0.04447	0.05325	1,189	2,059
Prague	1377	697.7	1.251	31.77	0.345	8.76	1377	2050	29,260	130.2	38,100	169.4	0.04030	0.04326	0.05180	1,208	2,093
Munich	1461	740.3	1.293	32.85	0.375	9.53	1471	2189	34,570	153.8	44,000	195.5	0.03800	0.04094	0.04902	1,253	2,175
London	1512	766.1	1.315	33.40	0.385	9.78	1523	2266	36,440	162.1	46,100	205.2	0.03660	0.03954	0.04736	1,280	2,224
Bittern	1572	796.5	1.345	34.16	0.345	8.76	1555	2314	29,260	130.2	39,300	174.8	0.03517	0.03815	0.04511	1,320	2,315
Paris	1620	820.9	1.345	34.17	0.345	8.76	1603	2385	29,260	130.2	39,700	176.4	0.03420	0.03721	0.04456	1,328	2,310
Antwerp	1879	952.1	1.451	36.85	0.385	9.78	1867	2778	36,440	162.1	48,500	215.7	0.02950	0.03251	0.03893	1,449	2,532
Lapwing	1965	995.7	1.504	38.20	0.385	9.78	1961	2918	36,440	162.1	49,000	218.0	0.02836	0.03169	0.03720	1,497	2,655
Berlin	2004	1015.4	1.504	38.20	0.415	10.54	2000	2977	42,340	188.3	55,200	245.5	0.02780	0.03058	0.03661	1,509	2,642
Madrid	2020	1023.5	1.504	38.20	0.385	9.78	1999	2974	36,440	162.1	49,400	219.7	0.02740	0.03044	0.03645	1,512	2,647
Chukar	2242	1136.0	1.602	40.69	0.395	10.03	2226	3312	38,360	170.6	52,700	234.5	0.02486	0.02851	0.03323	1,610	2,862
Bluebird	2726	1381.5	1.762	44.75	0.415	10.54	2696	4012	42,340	188.3	59,800	266.0	0.02044	0.02461	0.02835	1,788	3,246

2.4.3 Drop Voltage Pada Penghantar

Besarnya kerugian tegangan atau tegangan jatuh (*Drop Voltage*) yang terjadi pada suatu instalasi listrik, dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain :[8]

1. Panjang kabel Penghantar

Semakin panjang kabel penghantar yang digunakan, maka semakin besar Kerugian tegangan atau Tegangan jatuh yang terjadi.

2. Besar arus

Semakin besar arus listrik yang mengalir pada penghantar, maka semakin besar Kerugian tegangan atau Tegangan jatuh yang terjadi.

3. Tahanan jenis (Rho)

Semakin besar tahanan jenis dari bahan penghantar yang digunakan, maka semakin besar Kerugian tegangan atau Tegangan jatuh yang terjadi. Tahanan Jenis (Rho) beberapa jenis bahan penghantar besar kecilnya tahanan jenis penghantar tergantung pada bahan penghantar yang digunakan.

4. Luas Penampang penghantar.

Semakin besar ukuran luas penampang penghantar yang digunakan, maka semakin kecil Kerugian tegangan atau Tegangan jatuh yang terjadi.

Rumus menghitung Kerugian Tegangan (*Drop Voltage*)
Rumus untuk menghitung besarnya kerugian tegangan atau tegangan jatuh (*Drop Voltage*) pada instalasi listrik 3 *phase*.

$$V_r = (\sqrt{3} \times \rho \times L \times I \times \cos \phi) : A \quad (2.10)$$

Dimana : V_r : Tegangan jatuh (*Drop Voltage*)

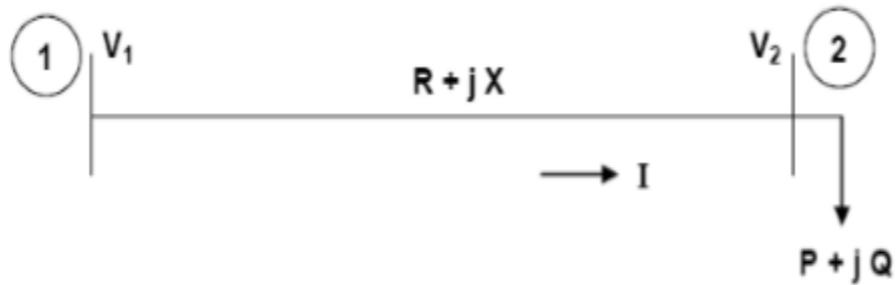
ρ : Tahanan jenis (rho)

L: Panjang kabel penghantar

I: Besar Arus

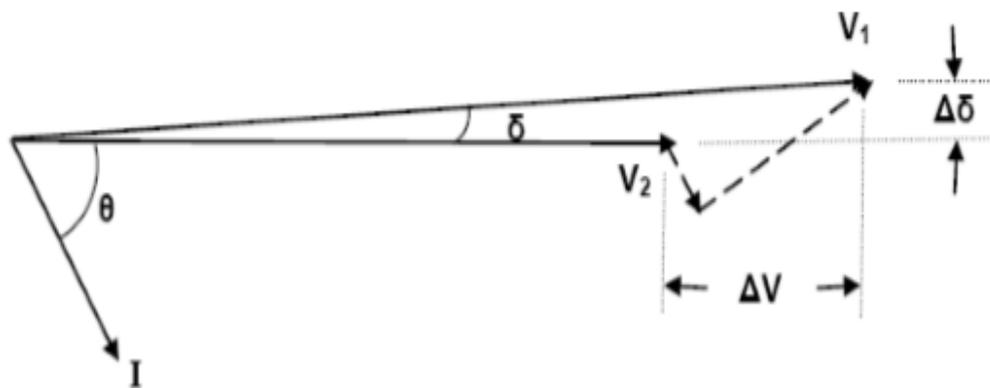
$\cos \phi$: Faktor daya

A: Luas Penampang



Gambar 2. 5 Saluran Transmisi Menyuplai Beban

Bus 1 merupakan bus pengirim dan bus 2 adalah bus penerima. Saluran memiliki impedansi $(R + jX) \Omega$. Dengan mengambil V_2 sebagai referensi, maka nilai arus yang muncul berbeda sudut fasa sebesar terhadap V_1 , Sementara nilai $R + jX$ yang merupakan nilai impedansi saluran transmisi, dan nilai $P + jQ$ yang merupakan nilai impedansi beban, dari kedua hal tersebut akan diperoleh nilai didapatkan *Diagram* phasor seperti Gambar dibawah.



Gambar 2. 6 *Diagram* Phasor

Dari *Diagram* phasor di atas, dapat ditulis persamaan sebagai berikut :

$$V_1^2 = (V_2 + \Delta V)^2 + \Delta \delta^2 \quad (2.11)$$

Dimana

$$\Delta V = \frac{RP}{V_2} + \frac{XQ}{V_2} \quad (2.12)$$

$$\Delta \delta = \frac{XP}{V_2} + \frac{RQ}{V_2} \quad (2.13)$$

Pada umumnya, $\Delta \delta$ akan lebih kecil dibandingkan $V_2 + \Delta V$. Sehingga dari Persamaan 1 didapatkan persamaan berikut :

$$V_1^2 = (V_2 + \Delta V)^2 \text{ dengan kata lain } V_1 = V_2 + \Delta V \quad (2.14)$$

Maka, jatuh tegangan pada saluran transmisi adalah

$$V_1 - V_2 = \Delta V = \frac{RP}{V_2} + \frac{XQ}{V_2} \quad (2.15)$$

Karena nilai resistansi R sangat kecil dibandingkan nilai reaktansi X, maka nilai R dapat diabaikan, sehingga diperoleh

$$\Delta V = \frac{XQ}{V_2} \quad (\text{B.M Weedy, 1998 : 85}) \quad (2.16)$$

Keterangan :

V_1 = Tegangan sisi kirim

V_2 = Tegangan sisi terima

P = Daya Aktif

Q = Daya Reaktif

ΔV = selisih V_1 dengan V_2

θ = Sudut antara I dgn V_1

δ = Sudut antara V_1 dengan V_2

I = Arus beban

R = Resistansi Saluran Transmisi

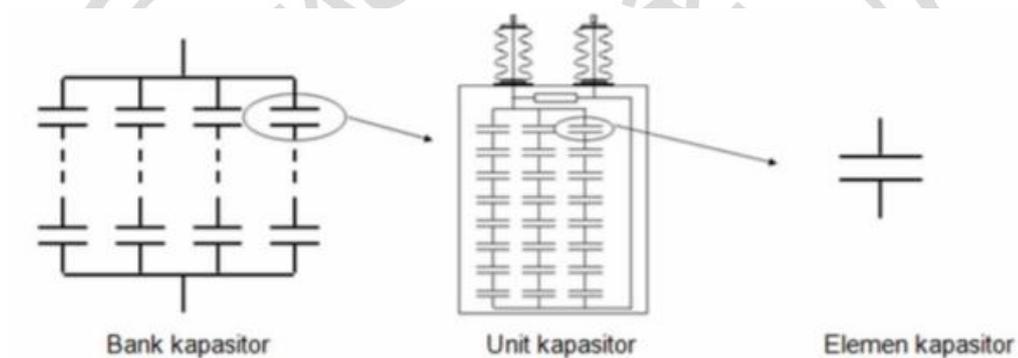
X = Reaktansi Saluran Transmisi.

2.5 Kapasitor

Bank kapasitor (*capacitor banks*) adalah peralatan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas pasokan energi listrik antara lain memperbaiki mutu tegangan di sisi beban, memperbaiki faktor daya ($\cos \phi$) dan mengurangi rugi-rugi transmisi. Kekurangan dari pemakaian bank kapasitor adalah menimbulkan harmonisa pada proses switching dan memerlukan desain khusus PMT atau switching controller.

[10]

Bagian-bagian kapasitor dapat dijelaskan pada gambar 2.5 sebagai berikut:



Gambar 2. 7 Bagian-Bagian Kapasitor

1. Elemen kapasitor

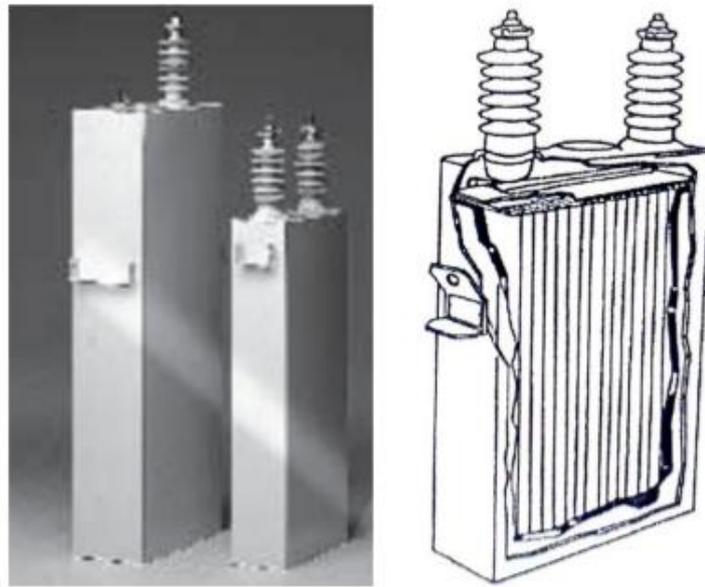
Elemen kapasitor merupakan bagian terkecil dari kapasitor yang berupa belitan aluminium foil dan *plastic film*.

2. Unit kapasitor

Sebuah unit kapasitor terdiri dari elemen-elemen kapasitor yang dihubungkan dalam suatu matriks secara seri dan parallel (Gambar 2.6).

Unit kapasitor rata-rata terdiri dari 40 elemen-elemen. Elemen-elemen kapasitor dihubungkan secara seri untuk membangun tegangan dan

dihubungkan secara paralel untuk membangun daya (VAR) pada unit kapasitor. Unit kapasitor dilengkapi dengan resistor yang berfungsi sebagai elemen pelepasan muatan kapasitor (*discharge device*). Rating tegangan unit kapasitor bervariasi dari 240 V sampai 25 kV dan rating kapasitas dari 2,5 kVAR sampai 1 MVAR.



Gambar 2. 8 Unit Kapasitor

3. Bank kapasitor

Unit-unit kapasitor terpasang dalam rak baja galvanis untuk membentuk suatu bank kapasitor dari unit-unit kapasitor fasa tunggal. Jumlah unit-unit kapasitor pada sebuah bank ditentukan oleh tegangan dan daya yang dibutuhkan. Untuk daya dan tegangan yang lebih tinggi, unit-unit kapasitor dihubungkan secara seri maupun paralel.

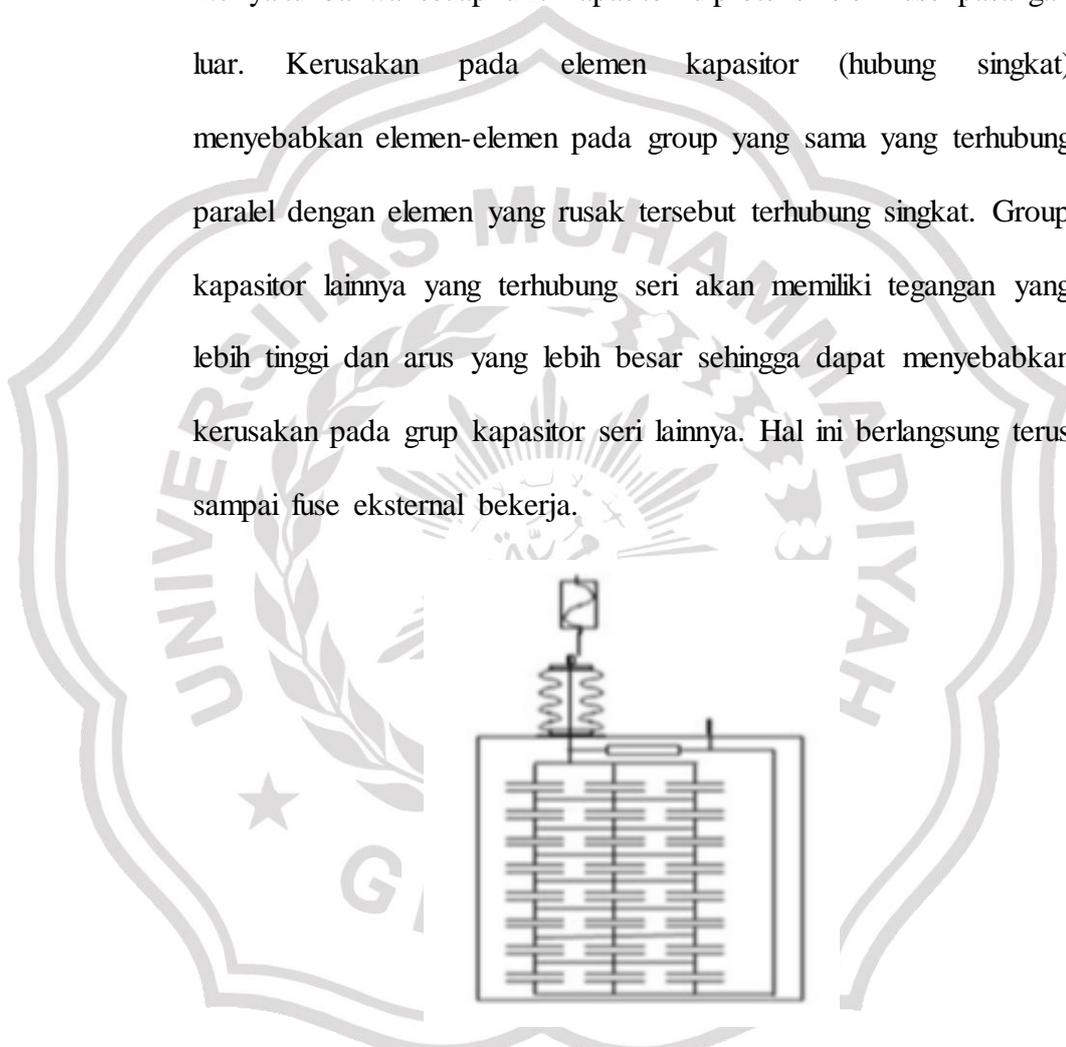
2.5.1 Kapasitor Berdasarkan Fuse

Unit kapasitor dikelompokkan berdasarkan letak fuse sebagai

proteksi unit kapasitor. Letak fuse ini mempengaruhi desain dari rangkaian kapasitor dan juga disain dari proteksi yang diterapkan. [10]

1. Fuse eksternal

Konstruksi kapasitor dengan eksternal fuse dapat dilihat pada gambar 2.7 yaitu bahwa setiap unit kapasitor diproteksi oleh fuse pasangan luar. Kerusakan pada elemen kapasitor (hubung singkat) menyebabkan elemen-elemen pada group yang sama yang terhubung paralel dengan elemen yang rusak tersebut terhubung singkat. Group kapasitor lainnya yang terhubung seri akan memiliki tegangan yang lebih tinggi dan arus yang lebih besar sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada grup kapasitor seri lainnya. Hal ini berlangsung terus sampai fuse eksternal bekerja.

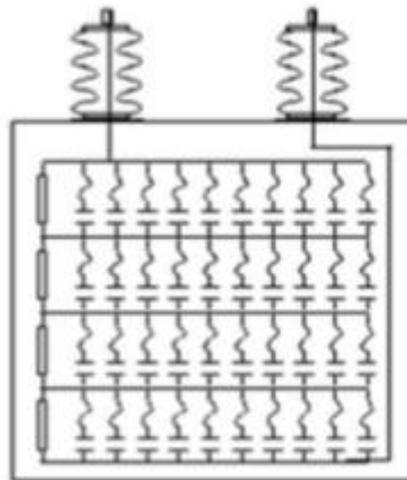


Gambar 2. 9 Kapasitor Fuse Ekternal

2. Fuse internal

Setiap elemen kapasitor dilengkapi fuse seperti gambar 2.8, apabila terjadi kegagalan elemen kapasitor maka fuse yang berfungsi sebagai pembatas arus akan memutuskan secara efektif suatu elemen saat terjadi

gangguan. Hanya sebagian kecil dari kapasitas total kapasitor yang hilang dan sisanya masih dapat beroperasi sehingga elemen tersebut terisolir dari elemen lainnya yang terhubung paralel dalam group. Umumnya bank kapasitor dengan fuse internal memiliki lebih sedikit unit kapasitor yang terhubung paralel dan lebih banyak group kapasitor yang terhubung seri dibandingkan dengan unit kapasitor yang memiliki fuse eksternal. Unit kapasitor dengan fuse internal umumnya memiliki ukuran yang besar karena diharapkan kerusakan seluruh elemen pada unit kapasitor bisa lebih lama.

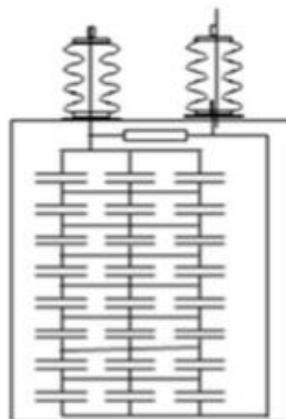


Gambar 2. 10 Kapasitor Fuse Internal

3. Tanpa fuse (fuseless)

Unit kapasitor tanpa fuse identik dengan unit kapasitor dengan fuse eksternal yang dijelaskan sebelumnya. Bank kapasitor tanpa fuse dihubungkan secara seri diantara fasa dan netral seperti pada gambar 2.9. Proteksi berdasarkan elemen dari kapasitor, apabila terjadi kerusakan pada elemen maka group elemen tersebut akan terhubung singkat

sedangkan unit kapasitor tetap beroperasi dengan distribusi tegangan pada group seri akan meningkat. Misal 6 unit kapasitor dihubung seri dan setiap unit kapasitor memiliki 8 elemen group seri sehingga total elemen group yang terhubung seri menjadi 48 elemen group. Apabila terjadi kerusakan pada satu elemen kapasitor maka satu elemen group seri terhubung singkat , akhirnya distribusi tegangan pada elemen group seri menjadi 48/47 atau terjadi kenaikan tegangan sekitar 2%. Kapasitor unit tanpa fuse biasanya tidak digunakan untuk tegangan sistem lebih kecil dari 35 kV atau minimal diperlukan 10 elemen seri agar bank kapasitor masih tetap dapat dioperasikan. Hal ini karena tegangan pada bank kapasitor menjadi 10/9 atau terjadi kenaikan tegangan sekitar 11%. Pada konfigurasi ini, discharge energi kecil karena unit kapasitor tidak ada yang dihubungkan paralel, selain itu proteksi unbalance tidak perlu di delay untuk koordinasi dengan fuse. Kapasitor jenis ini digunakan untuk filter harmonik dengan daya yang relatif rendah pada suatu level tegangan tinggi tertentu.



Gambar 2. 11 Kapasitor Fuseless

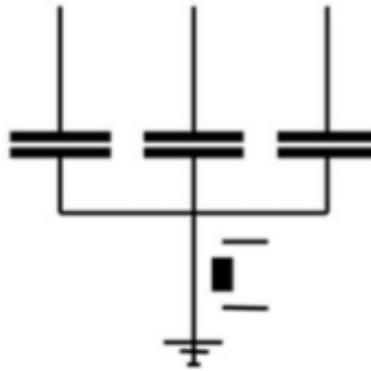
2.5.2 Kapasitor Berdasarkan Koneksi

Jumlah minimum unit yang terhubung paralel diperhitungkan apabila satu unit kapasitor terisolasi, tidak akan menyebabkan unbalance tegangan pada unit kapasitor lainnya melebihi 110% rating tegangan.

Jumlah minimum dari group kapasitor yang terhubung seri apabila satu group tereliminasi (hubung singkat) tidak akan menyebabkan kapasitor lain *over voltage* lebih dari 110%. Jumlah maksimum unit kapasitor pada setiap group paralel ditentukan oleh beberapa pertimbangan. Jika unit kapasitor rusak, unit kapasitor lain pada group paralel yang sama masih memiliki sejumlah muatan. Muatan sisa tersebut akan dibuang melalui kapasitor yang rusak dan melalui masing-masing fuse. Kapasitor yang rusak dan fuse harus tahan terhadap arus transient akibat pelepasan muatan tersebut.

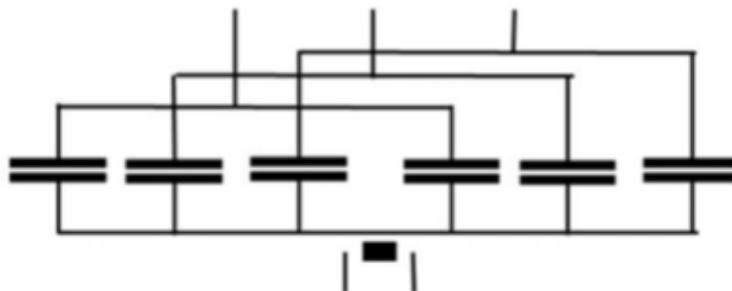
Pelepasan muatan transient dari paralel kapasitor dalam jumlah besar dapat memecahkan kapasitor yang rusak atau meledakkan fuse, yang dapat menyebabkan kerusakan pada unit terdekat atau kerusakan pada bank kapasitor. Untuk meminimalkan risiko diatas maka harus dibatasi energi maksimum yang tersimpan dalam group paralel kapasitor. Hal ini dapat dicapai dengan mengatur lebih banyak jumlah kapasitor dengan rating tegangan yang lebih kecil terhubung seri sehingga jumlah unit kapasitor dalam paralel group akan lebih sedikit tetapi mengurangi sensitivitas deteksi unbalance. 3 (tiga) koneksi bank kapasitor yang umum digunakan adalah sebagai berikut : [10]

1. Wye tunggal (Y) sebagian besar digunakan unit kapasitor fuse eksternal atau bank kapasitor dengan suatu rating daya yang rendah. Proteksi unbalance diperoleh dengan membandingkan netral bank kapasitor dengan ground.



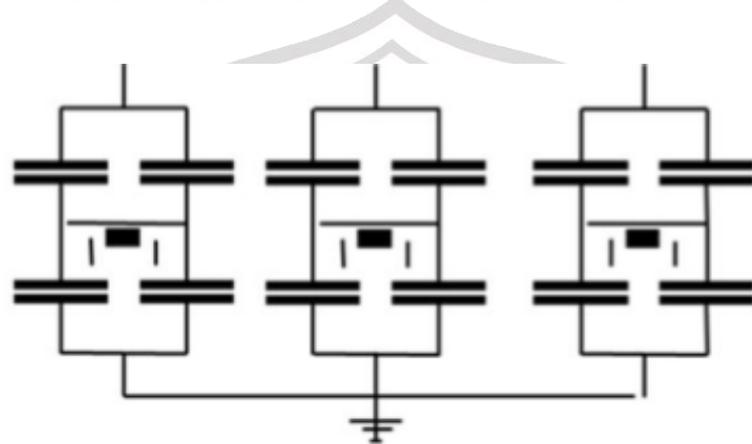
Gambar 2. 12 Koneksi Wye Tunggal (Y)

2. Wye dobel (YY) merupakan koneksi yang umum untuk kapasitor fuse internal dan sistem transmisi dengan suatu netral yang terisolasi. Proteksi unbalance dibentuk dengan membandingkan arus netral diantara dua koneksi wye. Proteksi unbalance sehingga tidak dipengaruhi oleh variasi tegangan padafeeding system.



Gambar 2. 13 Koneksi Wye Double (YY)

3. Koneksi Bridge (H) merupakan suatu koneksi wye dengan sebuah netral yang terhubung ke ground. Proteksi unbalance secara normal terpasang dalam setiap fasa dengan membandingkan 2 (dua) titik pertengahan dalam fasa. Koneksi ini biasa digunakan untuk sistem tegangan tinggi dengan netral yang terhubung solid ke ground.



Gambar 2. 14 Koneksi Bridge (H)

2.5.3 Kapasitor Shunt

Kapasitor shunt digunakan untuk kompensasi beban induktif dan untuk pengaturan tegangan ujung transmisi. Kapasitor shunt akan memperbaiki faktor daya jaringan, mengurangi rugi-rugi (*losses*) jaringan, menetralkan/meniadakan jatuh tegangan dan memperbaiki stabilitas tegangan sehingga dengan kata lain suatu kapasitor shunt akan menaikkan angka efisiensi pada jaringan dengan memperbaiki faktor daya.

Salah satu cara penting dalam mengatur profil tegangan pada bus adalah penempatan Shunt Capacitor pada bus-bus, baik pada sistem transmisi ataupun distribusi, dipasang di sepanjang saluran, atau pada Gardu Induk dan beban.. [11]



Gambar 2. 15 Kapasitor Shunt

Perbaikan faktor daya ini menggunakan kapasitor. Faktor daya dapat diperbaiki dengan memasang kapasitor. Kapasitor bertindak sebagai pembangkit daya reaktif dan oleh karenanya akan mengurangi jumlah daya reaktif, juga daya semu yang dihasilkan oleh bagian utilitas. Fungsi utamadari kapasitor yaitu sebagai penyeimbang beban induktif, Seperti yang kita ketahui beban listrik terdiri dari beban reaktif (R), induktif (L) dan kapasitif(C). Dimana kebanyakan beban memiliki karakteristik induktif, sehingga untuk menyeimbangkan karakteristik beban tersebut perlu digunakan kapasitor yang berperan sebagai beban kapasitif. Dengan pemasangan beban kapasitif, nilai arus induktif yang mengalir ke beban akan berkurang. Sebab beban mendapatkan suplai daya reaktif dari komponen kapasitor. [12]

2.6 DigSilent

Program perhitungan DIGSILENT PowerFactory, adalah *software* rekayasa yang berguna untuk analisis industri, utilitas, dan analisis sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini telah dirancang sebagai paket perangkat lunak canggih yang

terintegrasi dan interaktif yang didedikasikan untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol dalam rangka mencapai tujuan utama perencanaan dan optimasi operasi.

DIGSILENT Nama singkatan dari "DIGital SIMuLation and Electrical NeTwork calculation program". DIGSILENT PowerFactory dirancang dan dikembangkan oleh para insinyur berkualitas dan programmer dengan pengalaman bertahun-tahun di kedua bidang analisis sistem tenaga listrik dan bidang pemrograman. Akurasi dan validitas dari hasil yang diperoleh dengan perangkat lunak ini telah dikonfirmasi dalam sejumlah besar dan diimplementasi oleh organisasi-organisasi yang terlibat dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga.

Dalam rangka memenuhi kebutuhan analisis sistem kekuasaan saat ini, kekuatan sistem paket perhitungan DIGSILENT dirancang sebagai alat rekayasa terpadu yang menyediakan teknik lengkap "walk-around" melalui semua fungsi yang tersedia, bukannya sekumpulan modul perangkat lunak yang berbeda. Fitur kunci berikut ini diberikan dalam satu program executable tunggal DIGSILENT PowerFactory:

1. Fungsi inti PowerFactory: Definisi, modifikasi dan organisasi kasus, rutinitas numerik inti, dan fungsi dokumentasi output.
2. Garis grafis dan data penanganan kasus tunggal interaktif terpadu.
3. Elemen daya sistem dan database pada studi kasus-kasus dasar.
4. Fungsi perhitungan terintegrasi (misalnya garis dan perhitungan parameter mesin berdasarkan informasi geometris atau papan nama/nameplate).

5. Sistem tenaga konfigurasi jaringan dengan akses interaktif atau terkoneksi/online ke sistem SCADA.
6. Interface yang generik untuk sistem pemetaan dengan komputer.

Dengan menggunakan hanya satu database, yang berisi semua data yang dibutuhkan untuk semua peralatan dalam sistem tenaga (misalnya data busbar, Data Generator, data proteksi, *harmonic data*, *data controller*), PowerFactory dapat dengan mudah mengeksekusi salah satu atau semua fungsi yang tersedia, semua dalam lingkup program yang sama. Beberapa fungsi yang tersedia dalam DIgSILENT PowerFactory adalah analisis aliran beban/loadflow analysis, perhitungan arus pendek/*short-circuit calculation*, analisis harmonik/*harmonic analysis*, koordinasi proteksi/*protection coordination*, perhitungan stabilitas/*stability calculation* dan analisis modal/*modal analysis*. [13]. PowerFactory Simulation Function Berikut merupakan fungsi simulasi yang terdapat pada PowerFactory :

- a. Analisis Aliran Daya (*Load Flow Analysis*), untuk sistem sederhana maupun kompleks dengan 1-,2-, dan 3-fasa AC dan atau DC. □
Analisis Sistem Low Voltage
- b. Analisis Harmonik
- c. Simulasi RMS (simulasi dengan domain waktu untuk analisis stabilitas)
- d. Simulasi EMT (simulasi dengan domain waktu untuk transien elektromagnetik)
- e. Analisis Eigenvalue

- f. Identifikasi Model Parameter
- g. Analisis Kontingensi
- h. Analisis Keandalan
- i. General Adequacy Analysis □ Optimal Power Flow
- j. Analisis Proteksi
- k. Network Reduction
- l. State Estimation

Data Arangement Pada PowerFactory terdapat 4 data yang harus di atur.

Diantaranya :

- a. “Network Data” folder : Menyimpan semua data elemen.
- b. “Operation Scenario” folder : Menyimpan data operasi yang telah didefinisikan pada poin operasi tertentu.
- c. “Equipment Type” folder : Menimpan semua data type.
- d. “Study Case” folder : Menyimpan semua data managemen study.

2.6.1 Analisis Aliran Daya (Load Flow Analysis)

Pada PowerFactory, di jelaskan bahwa hasil perhitungan aliran daya akan berupa aliran daya aktif dan reaktif di semua cabang, dan besar tegangan serta sudutnya untuk semua titik. Area utama dari aplikasi perhitungan aliran daya dapat di bafi menjadi kondisi sistem normal dan abnormal (contingency).[14]

1. Kondisi Sistem Normal

- a. Perhitungan cabang-cabang beban, rugi-rugi sistem dan profil tegangan.

- b. Optimisasi, seperti meminimalisasi rugi-rugi sistem, minimalisasi biaya generator, dll.
- c. Perhitungan kondisi awal dari sebuah sistem steady-state untuk simulasi stabilitas atau perhitungan short-circuit dengan metode superposisi.

2. Kondisi Sistem Abnormal

- a. Perhitungan cabang-cabang beban, rugi-rugi sistem dan profil tegangan.
- b. Analisis kontingensi.
- c. Optimisasi, seperti meminimalisasi rugi-rugi sistem, minimalisasi biaya generator, dll.
- d. Verifikasi kondisi sistem saat perhitungan keandalan.
- e. Optimisasi pelepasn beban (load shedding).
- f. Perhitungan kondisi awal dari sebuah sistem steady-state untuk simulasi stabilitas atau perhitungan short-circuit dengan metode superposisi.

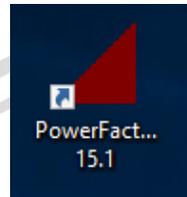
2.6.2 Pembuatan Simulasi Jaringan Pada Digsilent

Pemodelan jaringan merupakan rancangan rangkaian jaringan yang dibuat secara simulasi dengan menggunakan program DigSilent serta dapat menghitung *drop* tegangan.

Langkah-langkah pemodelan jaringan menggunakan program DigSilent :

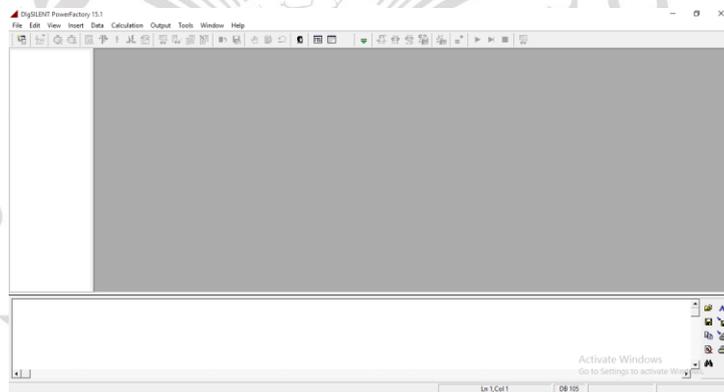
1. Jalankan Program DIgSILENT.

Program DIgSILENT dapat digunakan setelah di install kedalam komputer, setelah itu program dapat digunakan dengan cara mengklik program DIgSILENT.



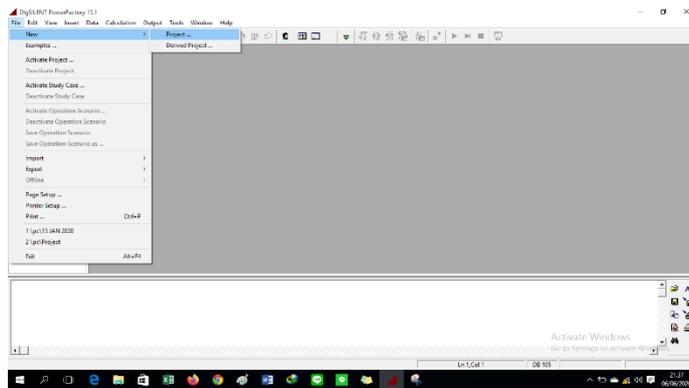
Gambar 2. 16 Icon shortcut program DIgSILENT

2. Setelah program dijalankan maka akan tampak tampilan seperti gambar 2.9 yang merupakan tampilan pertama program DIgSILENT.



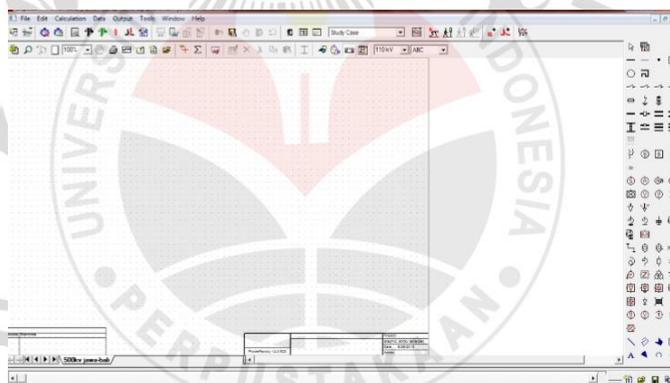
Gambar 2. 17 Tampilan awal program DigSilent.

3. Selanjutnya untuk membuat sebuah *project project* dengan klik menu File, pilih New dan klik *Project* dan menggambar one line *Diagram*.



Gambar 2. 18 Membuat *project* DigSilent

4. Setelah meng-klik “*Project*” maka akan muncul halaman dimana kita bisa memulai menggambar *one line Diagram*. Pada gambar 3.4 terdapat ruang untuk menggambar *one line Diagram* dengan menggunakan template yang terdapat pada toolbar terletak di sebelah kanan. Dan dianjurkan untuk memberi judul studi kasus yang akan dibuat, yang nantinya akan menjadi judul untuk “*grid*” pertama.



Gambar 2. 19 Tampilan utama untuk memulai menggambar *one line Diagram*