

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN *DISTRIBUTED*
GENERATION TERHADAP KOORDINASI RELE ARUS LEBIH DAN
PENUTUP BALIK OTOMATIS (*RECLOSER*)**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ERWIN HERY SETIYAWAN

NIM. 125060300111084

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2016

RINGKASAN

Erwin Hery Setiyawan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Agustus 2016. **Analisis Pengaruh Penambahan *Distributed Generation* Terhadap Koordinasi Rele Arus Lebih dan Penutup Balik Otomatis (*Recloser*)**. Dosen Pembimbing: Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. dan Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.

Distributed Generation saat ini merupakan solusi untuk energi terbarukan. Namun Penempatan *distributed generation* pada sebuah jaringan distribusi, akan sangat berpengaruh pada nilai arus gangguan yang muncul saat terjadi gangguan hubung singkat. Hal ini akan berimbas pada evaluasi *setting* rele proteksi di area penempatan *distributed generation* tersebut. *Distributed generation* yang digunakan adalah *wind turbine* dan *Micro Hydro*. Perhitungan arus hubung singkat dimulai dari menghitung impedansi sumber, reaktansi trafo, impedansi penyulang dan impedansi ekuivalen. Dalam mengatasi gangguan arus hubung singkat ini diperlukan koordinasi antar pengaman jaringan distribusi agar dapat mengisolasi gangguan dan melindungi jaringan distribusi serta peralatan yang berada di jaringan tersebut. Penyambungan *Distributed Generation* pada penyulang Pujon dapat menyebabkan kenaikan arus hubung singkat, yaitu arus hubung singkat tiga fasa penyulang Pujon sebelum tersambung *Distributed Generation* terbesar adalah 5932,6 A dan yang terkecil adalah 576,899 A. dan untuk arus gangguan hubung singkat dua fasa terbesar adalah 4194,98 A dan yang terkecil adalah 407,929 A. Sedangkan arus hubung singkat tiga fasa penyulang Pujon setelah tersambung *Distributed Generation* (*Micro Hydro* dan *Wind Turbine*) terbesar adalah 5977,68 A dan yang terkecil adalah 621,823 A. dan untuk arus gangguan hubung singkat dua fasa terbesar adalah 4239,189 A dan yang terkecil adalah 452,215A. Penyetelan *recloser* dan rele arus lebih pada sisi penyulang dan masukan 20 kV mengalami perubahan seting waktu koordinasi karena adanya kenaikan arus gangguan hubung singkat yang diakibatkan adanya penambahan *Distributed Generation* (*Micro Hydro* dan *Wind Turbine*). Semakin besar arus gangguan hubung singkat, maka waktu kerja rele semakin cepat. Hal ini dikarenakan rele akan cepat bereaksi terhadap arus gangguan yang besar untuk mengirim sinyal ke PMT untuk trip

Kata kunci: *Distributed Generation*, Arus gangguan hubung singkat, rele arus lebih, *recloser*.

SUMMARY

Erwin Hery Setiyawan, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya. August 2016. **Analysis Effect of Applying Distributed Generation Toward Overcurrent Relay and Recloser Coordination**. Academic Supervisor: Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. and Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.

Distributed Generation is the solution to renewable energy nowadays. However the placement of distributed generation in an electric distribution network will affect the value of fault current, the one that occurs when there is a short circuit fault. This will affect the evaluation of protection relay setting in distributed generation area. Wind turbine and Micro Hydro are the used distributed generation. Calculation of short circuit current counting starts from the source impedance, reactance transformer, feeder impedance and impedance equivalent. In addressing the short circuit current interruption is necessary coordination between the distribution network security to isolate the disturbances and protect the distribution network and equipment that are in the network. Connecting distributed generation to Pujon feeder can increase short-circuit current, while the highest value is 5932,6 A before the feeder is connected to distributed generation and 576,899 for the lowest value. The highest 2-phase short-circuit current is 4194,98 A and the lowest is 407,929 A. After connected to distributed generation (Micro Hydro and Wind Turbine), the highest value of 3-phase short-circuit current in Pujon feeder is 5977,68 A and the lowest is 621,823 A, while the highest value of 2-phase short-circuit current is 4239,189 A and the lowest is 452,215 A. The setting of recloser and overcurrent relay in feed side and 20 kV input have a change on coordination time setting because of increment of short-circuit current due to the adding of distributed generation (micro hydro and wind turbine). As short-circuit current get higher, the operation time of relay will cost less minute, because relay will react quickly to high fault current to transmit the signal to PMT to trip.

Keyword : *Distributed Generation, Short-circuit current, overcurrent relay, recloser.*



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Analisis Pengaruh Penambahan *Distributed Generation* Terhadap Koordinasi Rele Arus Lebih dan Penutup Balik Otomatis (*Recloser*)” dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada:

1. Keluarga tercinta Ayahanda Soenardi, Alm., dan Ibunda Emy Hariyati yang selalu memberikan kasih sayang dan do'anya yang tiada akhir, serta kakak tercinta Mas Windra Haris Susanto atas segala bentuk doa, dukungan, dan bantuan yang telah diberikan.
2. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik dan Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
4. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Ir. Mahfudz Shidiq, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi atas segala bimbingan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
5. Seluruh Asisten Laboratorium Sistem Daya Elektrik yang telah turut andil memberikan memberikan waktu, tenaga, pikiran, kebersamaan, semangat, dan saling mendukung dalam pengerjaan skripsi.
6. Seluruh teman-teman angkatan 2012 (Voltage), terutama teman-teman konsentrasi Teknik Energi Elektrik (Power 2012) yang telah berbagi suka dan duka dalam perkuliahan dan memberikan semangat dalam proses pengerjaan skripsi ini.
7. Seluruh teman-teman BK atas doa, bantuan, motivasi, kerjasama, dan kebersamaan dalam proses perkuliahan dan juga dalam pengerjaan skripsi.
8. Semua pihak yang telah membantu dan tidak bisa disebutkan satu persatu, terimakasih banyak atas semua bantuannya.

Disadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dan diharapkan agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta bagi masyarakat.

Malang, Agustus 2016

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II	5
2.1 <i>Distributed Generation</i>	5
2.2 Pengaruh <i>Distributed Generation</i> pada Proteksi	5
2.3 Wind Turbine	6
2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro.....	9
2.5 Sistem Proteksi Tenaga Listrik.....	9
2.5.1 Pengertian Sistem Proteksi	9
2.5.2 Tujuan Sistem Proteksi.....	10
2.6 Arus Gangguan	11
2.6.1 Komponen Simetris	11
2.6.2 Gangguan Hubung Singkat.....	13
2.7 Perhitungan Impedansi.....	16
2.7.1 Perhitungan Impedansi Sumber.....	16
2.7.2 Perhitungan Impedansi Transformator	17
2.7.3 Perhitungan Impedansi Penyulang	18
2.7.4 Perhitungan Impedansi Ekuivalen Jaringan	19
2.8 Sistem Pengamanan Jaringan Distribusi 20 kV	20
2.9 Peralatan Pengaman Arus Lebih	20
2.9.1 Penutup Balik Otomatis (PBO) atau <i>Recloser</i>	20
2.9.2 Rele Pengaman	23
2.10 Dasar Penyetelan Rele	32
2.10.1 Batas Minimum	32
2.10.2 Batas Maksimum.....	32

2.10.3	Dasar Penyetelan Waktu Kerja	32
2.11	Daerah Pengamanan	33
2.12	Koordinasi Pengaman.....	34
BAB III	35
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	35
3.2	Studi Literatur.....	36
3.3	Pengambilan Data.....	36
3.4	Pemodelan dan Simulasi.....	36
3.5	Pengambilan Kesimpulan dan Saran	36
BAB IV	37
4.1	Latar Belakang Gardu Induk Sengkaling	37
4.2	Sistem Distribusi Daya	39
4.2.1	Data Gardu Induk	39
4.2.2	Data Saluran	39
4.2.3	Data Pembebanan Transformator.....	42
4.3	<i>Distributed Generation</i>	45
4.3.1	<i>Wind Turbine</i>	45
4.3.2	Mikrohidro	47
4.3.3	Simulasi Hubung Singkat.....	48
4.4	Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat.....	48
4.4.1	Menghitung Impedansi Sumber	48
4.4.2	Menghitung Reaktansi Transformator	49
4.4.3	Menghitung Impedansi Penyulang.....	49
4.4.4	Menghitung Impedansi Ekuivalen Urutan Positif dan Urutan negatif.....	50
4.4.5	Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Simulasi Kondisi 1.....	51
4.4.6	Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Simulasi Kondisi 2.....	53
4.4.7	Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Simulasi Kondisi 3.....	54
4.4.8	Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Simulasi Kondisi 4.....	55
4.5	Koordinasi Rele Arus Lebih Pada Penyulang Pujon	56
4.5.1	Perhitungan setelan <i>Recloser</i> dan Rele Arus Lebih Pada Simulasi Kondisi 1..	56
4.5.2	Perhitungan setelan <i>Recloser</i> dan Rele Arus Lebih Pada Pada Simulasi Kondisi 2	60
4.5.3	Perhitungan setelan <i>Recloser</i> dan Rele Arus Lebih Pada Pada Simulasi Kondisi 3	62
4.5.4	Perhitungan setelan <i>Recloser</i> dan Rele Arus Lebih Pada Pada Simulasi Kondisi 4	64
BAB V	PENUTUP.....	67

5.1	Kesimpulan	67
5.2	Saran	67
DAFTAR PUSTAKA.....		69
LAMPIRAN		71





DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Aliran daya balik saat gangguan pada sistem tenaga listrik akibat penambahan distributed generation	6
Gambar 2. 2 Tiga Himpunan Fasor Seimbang yang Merupakan Komponen Simetris dari Tiga Fasor Tidak Seimbang.....	12
Gambar 2. 3 Penjumlahan Secara Grafis Komponen-komponen Untuk Mendapatkan Fasor-fasor Tak Seimbang	12
Gambar 2. 4 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	15
Gambar 2. 5 Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa	15
Gambar 2. 6 Single line diagram jaringan distribusi	16
Gambar 2. 7 Konversi XS dari 150 kV ke 20 kV.....	17
Gambar 2. 8 Bentuk Buka Tutup Hingga Terkunci pada Recloser.....	22
Gambar 2. 9 Skema Konsep Kerja Rele	23
Gambar 2. 10 Bagan Elemen Dasar Rele Pengaman.....	23
Gambar 2. 11 Karakteristik Rele Arus Lebih Instant	27
Gambar 2. 12 Rangkaian Rele Arus Lebih Dengan Karakteristik Instant.....	27
Gambar 2. 13 Karakteristik Arus Lebih Definite	30
Gambar 2. 14 Karakteristik Operasi Relay Invers Time	31
Gambar 2. 15 Daerah Pengaman Distribusi	33
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	35
Gambar 4. 1 Single line diagram penyulang pujan.....	38
Gambar 4. 2 Grafik arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 1	52
Gambar 4. 3 Grafik arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 2.....	53
Gambar 4. 4 Grafik arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 3.....	54
Gambar 4. 5 Grafik arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 4.....	55



DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Data Transformator Daya III Gardu Induk Sengkaling Malang	37
Tabel 4. 2 Data Panjang Saluran penyulang Pujon	40
Tabel 4. 3 Data Pembebanan Transformator	42
Tabel 4. 4 Kecepatan angin rata – rata setiap hari	46
Tabel 4. 5 Spesifikasi generator	47
Tabel 4. 6 Pengondisian sistem	48
Tabel 4. 7 Hasil perhitungan impedansi sumber, reaktansi urutan positif, reaktansi urutan negatif, dan reaktansi urutan nol sistem 20 kV penyulang Junrejo	49
Tabel 4. 8 Impedansi penyulang mulai dari GI hingga ujung penyulang	50
Tabel 4. 9 Hasil perhitungan impedansi ekivalen(Z_{1eki} dan Z_{2eki}) menurut lokasi terjadinya gangguan mulai dari GI hingga ujung penyulang dengan panjang 59,654 km. .	50
Tabel 4. 10 Hasil arus gangguan hubung singkat:.....	52
Tabel 4. 11 Hasil arus gangguan hubung singkat:.....	53
Tabel 4. 12 Hasil arus gangguan hubung singkat:.....	54
Tabel 4. 13 Hasil arus gangguan hubung singkat:.....	55
Tabel 4. 14 Data rele arus lebih masukan GI Sengkaling	56
Tabel 4. 15 Data rele arus lebih penyulang Pujon.....	56
Tabel 4. 16 Data Penutup Balik Otomatis atau Recloser	56
Tabel 4. 17 Koordinasi rele arus lebih dan recloser pada 4 simulasi kondisi.....	65





DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Single Line Diagram Penyulang Pujon	72
Lampiran 2 Gambar Rangkaian Penyulang Pujon	73
Lampiran 3 Impedansi saluran	74
Lampiran 4 Daftar Trafo GI Sengkaling	75
Lampiran 5 Beban Trafo dan Penyulang Gardu Induk Sengkaling.....	76
Lampiran 6 Setting Relay Penyulang Gardu Induk Sengkaling Malang2014.....	77
Lampiran 7 Kawat Penghantar	78
Lampiran 8 Arus Hubung Singkat GI/GITET P3B Jawa Bali Semester Dua, Tahun 2012 Untuk Perhitungan Sistem Proteksi.....	79
Lampiran 9 Spesifikasi dan Performa Turbin	80





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan tenaga listrik sudah menjadi kebutuhan primer bagi manusia. Segala perangkat penunjang kegiatan manusia hampir selalu memerlukan energi listrik. Listrik dibangkitkan dari sumber daya primernya (tenaga air, batubara, gas dll) dan selanjutnya listrik tersebut disalurkan/ditransmisikan serta didistribusikan ke konsumen. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sistem penyaluran tenaga listrik yang baik dari tempat dibangkitkan (generator) menuju tempat dimana konsumen membutuhkan tenaga listrik. Penambahan pembangkit listrik yang besar tentu akan membutuhkan biaya yang besar pula dan waktu pembangunan yang lama.

Pembangkit Terdistribusi merupakan terobosan teknologi generasi baru dan merupakan solusi energi terbarukan. Pembangkit Terdistribusi atau yang disebut juga *Distributed Generation* merupakan pembangkit berkapasitas kecil yang terletak pada sistem distribusi tenaga listrik dan bersifat tersebar pada sistem tenaga listrik tersebut.

Pembangkitan Terdistribusi (PT) umumnya berupa sistem energi terbarukan atau sistem energi berkarbon rendah yang berskala kecil menengah, yang terletak di dekat pusat beban. Berbagai macam keuntungan dari PT telah didiskusikan dalam literatur riset, seperti menyuplai beban pada area yang terpencil dan tanpa akses jaringan listrik, menambah fasilitas pembangkit, membangkitkan energi bersih, mengurangi rugi transmisi, meremajakan fasilitas infrastruktur dan memberikan dukungan tambahan seperti tegangan, kualitas daya, keandalan, dan lain-lain.

Beberapa teknologi *distributed generation* memiliki polusi yang rendah dan efisiensi total yang tinggi seperti *combined heat and power* (CHP) dan pembangkit listrik tenaga hidro (PLTMH). Disamping itu, energi terbarukan yang dapat digunakan sebagai *distributed generation* yaitu, *photovoltaic* dan *micro hydro*. Saat ini, *micro hydro* mempunyai kontribusi yang besar dalam pembangkitan listrik oleh *distributed generation*. Namun demikian, masalah timbul ketika *distributed generation* ini terintegrasi dengan jaringan sistem distribusi karena sistem distribusi yang ada dirancang dalam bentuk jaringan radial tanpa mempertimbangkan integrasi dari *distributed generation* ini (K. Vijeta, D.V.S.S Siva Sarma : 2012).

Penempatan *distributed generation* pada sebuah jaringan distribusi, akan sangat berpengaruh pada nilai arus gangguan yang muncul saat terjadi gangguan hubung singkat, baik itu hubung singkat tiga fasa atau satu fasa ke tanah di sekitar area penempatan *distributed generation* tersebut (Michael T. Doyle). Pada jaringan distribusi tipe radial, penempatan *distributed generation* akan sangat berpengaruh pada nilai arus gangguan. Hal ini akan berimbas pada evaluasi *setting* rele proteksi di area penempatan *distributed generation* tersebut (T.Mashau, S.Kibaara, S.Chowdhury, S.P.Chowdhury : 2011).

Jadi berdasarkan latar belakang tersebut maka dipilihlah judul tentang “Analisis Pengaruh Penambahan *Distributed Generation* Terhadap Koordinasi Rele Arus Lebih Dan Penutup Balik Otomatis (*Recloser*)”.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang diuraikan dalam latar belakang, maka rumusan masalah yang ada pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa besar arus hubung singkat yang terjadi sebelum dan setelah terintegrasi dengan *distributed generation*.
2. Bagaimana koordinasi peralatan pengaman Rele Arus Lebih dan *Recloser* sebelum dan setelah terintegrasi dengan *distributed generation*.

1.3 Batasan Masalah

Agar masalah yang akan dibahas menjadi jelas dan tidak banyak menyimpang dari topik yang akan dibahas, maka dalam penulisan skripsi ini penulis menekankan, bahwa hal yang akan dibahas adalah:

1. Pembahasan pada tahap perencanaan terintegrasi dengan *wind turbine* dan *micro hydro* pada penyulang pujan.
2. Peralatan pengaman yang terletak pada sistem distribusi jaringan tegangan menengah 20 kV seperti *Fuse Cut Out (FCO)*, *Sectionanalyzer (SSO)*, *Load Break Switch (LBS)*, *Automatic Vacuum Switch (AVS)* tidak dianalisis.
3. Perhitungan arus hubung singkat meliputi analisis gangguan hubung singkat tiga fasa dan dua fasa.
4. Rele proteksi yang digunakan yaitu rele arus lebih waktu terbalik biasa.
5. Hasil dari tugas akhir ini berupa analisa dan simulasi.
6. Tidak membahas secara keseluruhan dan pengaruh peletakan *distributed generation*. Hanya pengaruhnya terhadap proteksi sistem distribusi.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan penulisan skripsi ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh penambahan *distributed generation* terhadap kenaikan arus hubung singkat.
2. Untuk mengetahui pengaruh penambahan *distributed generation* terhadap koordinasi dan setelan peralatan pengaman Rele Arus Lebih dan *Recloser*.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penulisan skripsi ini dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan koordinasi sistem proteksi saat terintegrasi dengan *distributed generation*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- **BAB I. PENDAHULUAN**

Bab ini membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat skripsi ini.

- **BAB II. TINJAUAN PUSTAKA**

Membahas mengenai teori tentang *Distributed Generation*, Gangguan pada Sistem Jaringan Distribusi, Gangguan Hubung Singkat, *Recloser*, *Over Current Relay*, Sistem Proteksi, Koordinasi Sistem Proteksi, dan Pengaruh *Distributed Generation* pada Proteksi.

- **BAB III. METODE PENELITIAN**

Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini, meliputi pengambilan data, prosedur perhitungan data.

- **BAB IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Berisi data hasil perhitungan, dan pemodelan dan koordinasi sistem

- **BAB V. KESIMPULAN**

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan saran dari penulis.

- **DAFTAR PUSTAKA**

Memaparkan tentang sumber-sumber literatur yang digunakan dalam penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Distributed Generation*

Pembangkit listrik tersebar (DG) berkaitan dengan penggunaan unit pembangkit kecil pada titik-titik strategis dari suatu sistem tenaga listrik atau yang dekat dengan lokasi pusat beban. DG dapat digunakan dengan cara yang terisolasi, memasok permintaan konsumen lokal atau diintegrasikan ke dalam grid untuk memasok energi sistem tenaga listrik. Teknologi DG dapat berjalan pada sumber energi terbarukan, seperti bahan bakar fosil atau limbah panas. Peralatan berkisar dalam ukuran kurang dari satu kilowatt untuk ton megawatt. DG dapat memenuhi semua atau sebagian dari kebutuhan listrik pelanggan jika terhubung ke saluran distribusi atau saluran transmisi, kemudian daya dapat dijual kepada pihak ketiga. (Loi Lei Lai, Tze Fun Chan, 2007:1)

2.2 *Pengaruh Distributed Generation pada Proteksi*

Sistem proteksi arus lebih konvensional pada penyulang selama ini berdasar pada skema radial dari jaringan distribusi. Jaringan radial memiliki karakter berupa letak sumber pada sisi hulu dan beban atau gardu induk pada sisi hilir. Aliran arus gangguan berasal dari satu sumber, dan memiliki arah dari titik sumber ke titik gangguan.

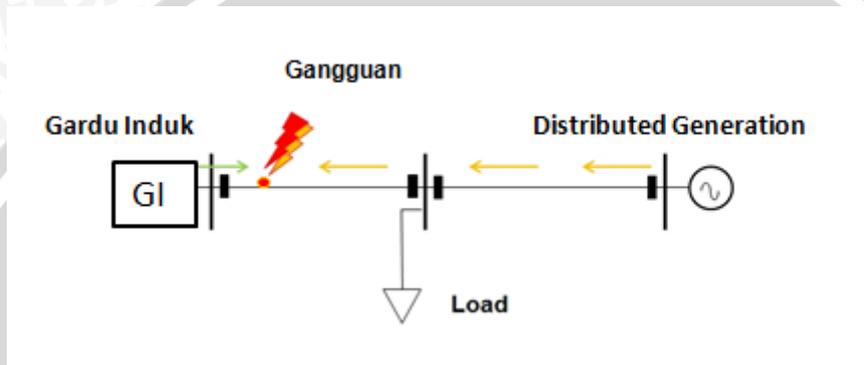
Pada jaringan radial, selektivitas proteksi gangguan berasal dari koordinasi waktu dan arus dari rele arus lebih. Koordinasi berdasarkan fakta pada sistem radial, yaitu rele yang paling dekat dengan gangguan akan merasakan arus gangguan terbesar daripada rele yang lain. Pada gangguan tertentu, semua rele yang terhubung dalam jaringan radial akan merasakan arus gangguan, tetapi setiap rele diatur untuk beroperasi pada waktu yang berbeda-beda, dengan memilih karakteristik arus dan waktu yang berbeda pada saat dilakukan penyetingan rele.

Distributed generation umumnya berupa sistem energi terbarukan atau sistem energi berkarbon rendah yang berskala kecil menengah, yang terletak di dekat pusat beban. Berbagai macam keuntungan dari *distributed generation* telah didiskusikan dalam literatur riset, seperti menyuplai beban pada area yang terpencil dan tanpa akses jaringan listrik, menambah fasilitas pembangkit, membangkitkan energi bersih, mengurangi rugi transmisi, meremajakan fasilitas infrastruktur dan memberikan dukungan tambahan seperti tegangan, kualitas daya, keandalan, dan lain-lain.

Menambahkan *distributed generation* ke sebuah jaringan radial akan memberikan pengaruh pada jaringan tersebut, yaitu akan mempengaruhi distribusi arus gangguan. Oleh sebab itu, penambahan *distributed generation* ini akan mempengaruhi operasi dan koordinasi dari peralatan proteksi dan *recloser*.

Beberapa akibat penambahan *distributed generation* yang tercatat adalah :

- a) Adanya aliran daya balik dari *distributed generation*, menuju gangguan di hulu pada sisi sumber. Sementara seharusnya aliran daya normal mengalir menuju beban di area lokal *distributed generation* dapat di lihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Aliran daya balik saat gangguan pada sistem tenaga listrik akibat penambahan *distributed generation*

Sumber : Penulis

- b) Kesalahan pemutusan daya pada penyulang yang normal karena gangguan, yang diakibatkan penambahan *distributed generation* pada jaringan tersebut.
- c) Gangguan pada pemutusan daya penyulang yang diakibatkan karena *transien* atau arus *inrush* dari komponen elektrikal sistem *distributed generation*.
- d) Gagalnya penutup balik otomatis.
- e) Kurang tepatnya waktu penutup balik sehingga merusak *distributed generation*.
- f) Hilangnya koordinasi dari peralatan proteksi arus lebih seperti koordinasi *fuse-fuse*, koordinasi *fuse-rele* dan koordinasi *rele-rele* yang diakibatkan karena penempatan *distributed generation* dalam jaringan distribusi radial.

2.3 Wind Turbine

Sistem energi angin memanfaatkan energi kinetik angin dan mengubahnya menjadi energi listrik atau menggunakannya untuk melakukan pekerjaan lain, seperti pompa air dan menggiling biji-bijian. Energi kinetik angin dengan massa udara m bergerak dengan kecepatan v dapat dinyatakan sebagai (Dubey dan Tiwari, 2012 : 3) :

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.1)$$

dengan:

- E_k = energi kinetik
- m = massa udara
- v = kecepatan angin

Energi kinetik dari perpindahan udara horisontal diubah menjadi energi kinetik rotasi turbin melalui sejumlah baling-baling yang porosnya terhubung. Rotasi ini kemudian diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan generator tenaga listrik. Energi angin merupakan sumber baru yang paling terlihat dari energi listrik. Pembangkit ini dihubungkan sebagai instalasi kecil ke jaringan tegangan rendah atau menengah (Bollen dan Hassan, 2011:2).

Turbin angin dirancang untuk menangkap energi kinetik yang dihasilkan oleh angin dan mengubahnya menjadi energi listrik. Sebuah analogi dapat ditarik antara turbin angin dan unit pembangkit konvensional yang memanfaatkan energi kinetik uap. Dari sudut pandang pemodelan, turbin angin dengan kecepatan tetap terdiri dari komponen-komponen berikut:

- Turbin rotor dan perakitan baling-baling (penggerak utama)
- Poros dan Unit girboks (pengubah dorongan dan kecepatan)
- Induksi Generator
- Sistem kontrol

Energi listrik yang diproduksi turbin angin tergantung pada interaksi antara rotor turbin angin dan angin. Berarti keluaran daya ditentukan oleh kecepatan angin rata-rata, sehingga aerodinamis *steady-state* telah dianggap menjadi penting dalam proyek ini dan turbulensi telah diabaikan. Daya yang tersedia dalam angin dapat ditentukan dari persamaan di bawah ini:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3_{wind} \quad (2.2)$$

dengan:

- P_{wind} = daya yang dibangkitkan oleh angin (watt)
- ρ = kerapatan udara (ds)
- A = luas baling – baling (m^2)
- v = kecepatan angin (m/s)

Dalam persamaan di atas, ρ adalah densitas udara, A adalah luas baling-baling, dan V_{wind} adalah kecepatan angin. Betz membuktikan bahwa daya maksimum dihasilkan oleh rotor turbin yang ideal dengan baling tak terbatas dari angin di bawah kondisi ideal adalah 59,26% (0,5926 kali) dari daya angin yang tersedia. Batas ini dikenal sebagai batas Betz. Dalam praktiknya, turbin angin terbatas pada dua atau tiga bilah karena kombinasi dari pertimbangan struktur dan ekonomi, dan karenanya, jumlah daya yang dapat mereka hasilkan sekitar 50% (0,5 kali) dari daya yang tersedia. Rasio daya yang dihasilkan untuk daya yang tersedia dinyatakan sebagai C_p koefisien daya rotor. Daya yang dapat dihasilkan demikian ditulis sebagai (Singh dan Santoso, 2011:3) :

$$P_{wind} = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3_{wind} \quad (2.3)$$

dengan:

P_{wind} = daya yang dibangkitkan oleh angin

C_p = koefisien daya rotor

ρ = kerapatan udara

A = luas baling – baling

v = kecepatan angin

Nilai dari C_p tergantung dari perbandingan kecepatan *downstream* dan *upstream* dari angin. Suatu analisis menunjukkan bahwa dalam suatu desain yang praktis nilai maksimum yang dapat dicapai oleh C_p berkisar antara 0,4 – 0,5 untuk turbin modern berkecepatan tinggi dengan dua baling–baling, sedangkan untuk turbin berkecepatan rendah dengan baling–baling lebih dari dua nilai C_p berkisar antara 0,2 – 0,4 (Patel, 2006:30).

Produksi tenaga angin mempunyai variasi sangat sedikit dalam jangka waktu detik, lebih bervariasi dalam jangka waktu menit dan sangat bervariasi dalam jangka waktu jam (Bollen dan Hassan, 2011:2).

Analisis rekor kecepatan angin dari Brookhaven, new york (418), pada tahun 1950 menunjukkan spektrum daya dengan tiga macam puncak yang berbeda sebagai berikut :

- puncak *turbulance* antara 30 detik dan 3 menit
- puncak harian antara 12 jam
- puncak *synoptic* antara 2 dan 10 hari

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan energi air sebagai penggerakannya, misalnya saluran irigasi, sungai atau air terjun dengan cara memanfaatkan tinggi terjunnya (*head*) dan jumlah debit airnya. Kondisi energi air yang dimanfaatkan sebagai sumber daya penghasil listrik memiliki kapasitas aliran maupun ketinggian tertentu. Semakin besar kapasitas aliran maupun ketinggiannya maka semakin besar energi yang dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit tenaga mikrohidro bekerja dengan cara memanfaatkan semaksimal mungkin energi potensial air. Energi ini secara perlahan diubah menjadi energi mekanis saat melalui nosel yang ditembakkan untuk memutar sudut-sudut turbin. Energi mekanis dari putaran turbin akhirnya diubah menjadi energi listrik melalui putaran generator (repository.usu.ac.id,8/5/2014).

Untuk menghitung daya yang dibangkitkan oleh generator adalah :

$$P = 9,8 \eta H Q \quad (2.4)$$

dengan:

P = daya terbangkit (KW)

H = tinggi terjun air (m)

Q = debit air (m³/ detik)

η = efisiensi turbin generator

(Teguh Utomo,2010)

2.5 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

2.5.1 Pengertian Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat-perangkat lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi proteksi. Gangguan pada sistem distribusi dapat diakibatkan oleh faktor alam, kelalaian manusia, atau kerusakan peralatan. (Bonar Pandjaitan 2012)

Macam-macam gangguan pada sistem distribusi dikelompokkan menjadi:

1. Gangguan yang bersifat temporer yang dapat hilang dari sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangan.
2. Gangguan yang bersifat permanen, dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan untuk menghilangkan penyebab gangguan tersebut.

Sistem proteksi penyulang tegangan menengah ialah pengamanan yang terdapat pada sel-sel tegangan menengah di Gardu Induk dan pengamanan yang terdapat pada jaringan

tegangan menengah. Penyulang tegangan menengah ialah penyulang tenaga listrik yang berfungsi untuk mendistribusikan tenaga listrik tegangan menengah (6kv - 20kv).

Sedangkan sistem tenaga listrik sendiri adalah untuk menghasilkan dan menyalurkan energi listrik ke beban. Sistem tersebut harus dirancang dan dikendalikan untuk pengiriman energinya ke pengguna secara handal dan ekonomis.

2.5.2 Tujuan Sistem Proteksi

Gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik hampir seluruhnya merupakan gangguan hubung singkat, yang akan menimbulkan arus yang cukup besar. Semakin besar sistemnya semakin besar gangguannya. Arus yang besar bila tidak segera dihilangkan akan merusak peralatan yang dilalui arus gangguan. Untuk melepaskan daerah yang terganggu itu maka diperlukan suatu sistem proteksi, yang pada dasarnya adalah alat pengaman yang bertujuan untuk melepaskan atau membuka sistem yang terganggu, sehingga arus gangguan ini akan padam.

Adapun tujuan dari sistem proteksi antara lain (Hutaruk, 1991):

1. Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan akibat gangguan pada peralatan yang terganggu atau peralatan yang dilalui oleh arus gangguan. Semakin cepat sistem proteksi bekerja maka pengaruh gangguan akan semakin kecil.
2. Untuk melokalisir (mengisolir) daerah gangguan menjadi sekecil mungkin.
3. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi.
4. Mengamankan manusia dari bahaya listrik.

2.2 Persyaratan Sistem Proteksi

Persyaratan terpenting dari sistem proteksi yaitu (Bonar Pandjaitan, 2012):

1. Kepekaan (*sensitivity*)

Rele pengaman harus mempunyai kepekaan yang tinggi terhadap besaran minimal sebagaimana direncanakan. Rele pengaman harus dapat bekerja pada awal terjadinya gangguan. Oleh karena gangguan lebih mudah diatasi pada awal kejadian. Hal ini memberi keuntungan dimana kerusakan peralatan yang harus diamankan menjadi kecil.

2. Keandalan (*Reliability*)

Keandalan merupakan kemampuan rele untuk selalu dapat bekerja dengan baik dan benar atau dengan peralatan lain selalu dapat dipercaya dan dapat diandalkan, walaupun pada kondisi sistem dan lingkungan yang kurang menguntungkan. Keandalan dapat dibagi menjadi dua unsur yaitu kemampuan rele untuk selalu dapat

dengan benar apabila dibutuhkan dan kemampuan rele untuk tidak bekerja bila tidak dibutuhkan atau mencegah kerja yang tidak perlu.

3. Selektifitas (*Selectivity*)

Selektivitas suatu sistem proteksi jaringan tenaga adalah kemampuan rele proteksi untuk melakukan tripping secara tepat sesuai rencana yang telah ditentukan pada waktu mendesain sistem proteksi tersebut. Dalam pengertian lain, suatu sistem proteksi sistem tenaga harus bisa kerja secara selektif sesuai klasifikasi dan jenis gangguan yang harus diamankan.

4. Kecepatan (*Speed*)

Kecepatan kerja suatu pengamanan rele pengamanan adalah kemampuan rele untuk bekerja sesuai dengan waktu yang dibutuhkan. Kemampuan sistem proteksi untuk memisahkan gangguan secepat mungkin dari sistem akan mengurangi akibat yang ditimbulkan oleh gangguan tersebut. Maka kecepatan kerja rele pengamanan merupakan faktor yang sangat penting.

5. Ekonomis

Suatu hal yang harus diperhatikan sebagai persyaratan rele pengamanan adalah masalah biaya. Sangat mendasar untuk mendapatkan perlindungan maksimum dengan biaya minimum. Biaya tersebut harus dievaluasi dari segi tingginya biaya peralatan yang dilindungi dengan perlindungan yang tidak tepat atau tidak sesuai dengan kebutuhan.

2.6 Arus Gangguan

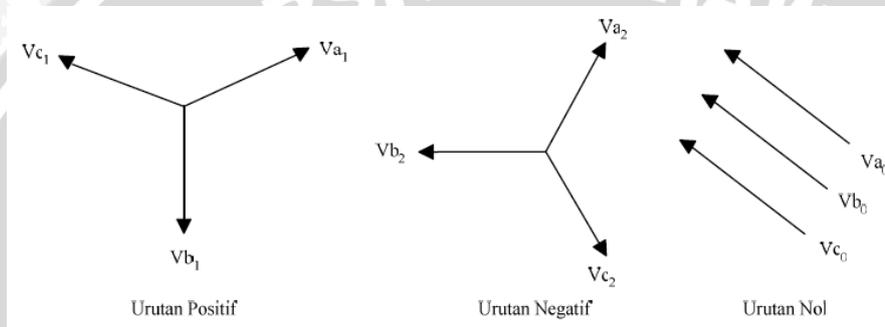
2.6.1 Komponen Simetris

Menurut toerama Fortercue, tiga fasa tidak seimbang pada suatu sistem tiga fasa dapat diturunkan menjadi tiga fasor seimbang yaitu (Stevenson, 1994:272) :

1. Komponen-komponen urutan positif (*positive sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam sudut fasa 120° dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya.
2. Komponen-komponen urutan negatif (*negative sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam sudut sebesar 120° dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya.

3. Komponen-komponen urutan nol (*zero sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara yang satu dengan yang lainnya.

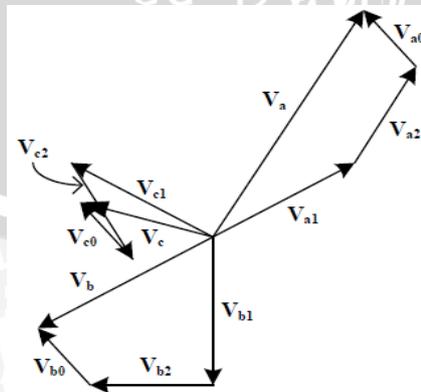
Urutan fasa komponen positif dari fasor tidak seimbang adalah a,b,c sedangkan urutan negatif adalah a,c,b. Jika fasor aslinya tersebut adalah tegangan dapat dinyatakan dengan V_a, V_b, V_c . Ketiga komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk urutan positif, 2 untuk urutan negatif, dan 0 untuk urutan nol. Sehingga dari fasor tegangan komponen simetris secara berurutan dapat dinyatakan dengan $V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}, V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}, V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}$. Fasor tegangan tiga fasa tidak seimbang dari komponen simetrisnya terlihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Tiga Himpunan Fasor Seimbang yang Merupakan Komponen Simetris dari Tiga Fasor Tidak Seimbang

Sumber: Stevenson, 1996:273

Suatu besaran tiga fasa yang tidak seimbang dinyatakan oleh jumlah tiga fasa komponen yang seimbang yang terdiri dari atas urutan positif, negatif, dan nol. Setiap fasor tak seimbang yang asli adalah jumlah dari komponen-komponennya seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Penjumlahan Secara Grafis Komponen-komponen Untuk Mendapatkan Fasor-fasor Tak Seimbang

Sumber : Stevenson, 1996:274

Dari gambar 2.3 fasor asli dapat dinyatakan dalam suku komponennya atau persamaan sebagai berikut (Stevenson, 1996:273):

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.5)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (2.6)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2.7)$$

2.6.2 Gangguan Hubung Singkat

Dari jenis gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu (Penangsang, O., 2005 yang dikutip dalam penelitian yang dilakukan Dhipaatmaja, 2012:6):

a. Hubung Singkat Simetris.

Merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi.

b. Hubung Singkat Tak Simetris (Asimetris).

Merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang.

Gangguan hubung singkat yang termasuk ke dalam gangguan tak simetris (asimetris) adalah hubung singkat satu fasa maupun dua fasa, sedangkan gangguan simetris adalah hubung singkat tiga fasa (NFPA 70E, 2003). Hampir semua gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan tidak simetris. Gangguan-gangguan tak simetris akan menyebabkan mengalirnya arus tak seimbang dalam sistem sehingga untuk menganalisis gangguan yang terjadi digunakan metode komponen simetris untuk menentukan arus maupun tegangan di semua bagian sistem setelah terjadi gangguan. Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu, juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu dan dapat mengakibatkan arus yang jauh lebih besar dari pada arus normal. Gangguan dapat diperkecil dengan cara pemeliharannya. Bila gangguan hubung singkat dibiarkan berlangsung dengan lama pada suatu sistem daya, banyak pengaruh-pengaruh yang tidak diinginkan yang dapat terjadi :

- Berkurangnya batas-batas kestabilan untuk sistem daya.
- Rusaknya perlengkapan yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan oleh arus tak seimbang, atau tegangan rendah yang ditimbulkan oleh hubung singkat.
- Ledakan-ledakan yang mungkin terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sewaktu terjadinya suatu hubung singkat, dan yang mungkin

menimbulkan kebakaran sehingga dapat membahayakan orang yang menanganinya dan merusak peralatan-peralatan yang lain.

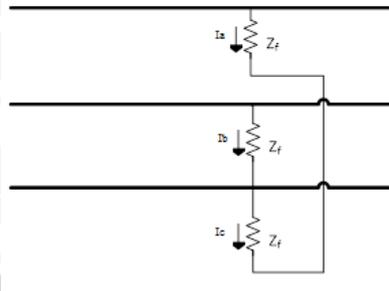
- d. Terpecah-pecahnya keseluruhan daerah pelayanan sistem daya itu oleh suatu rentetan tindakan pengamanan yang diambil oleh sistem-sistem pengamanan yang berbeda-beda, kejadian ini di kenal sebagai *cascading*.

Perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah analisis suatu sistem tenaga pada saat dalam gangguan hubung singkat, dimana nantinya akan diperoleh besar nilai besaran-besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan dasar isolasi (*basic insulation strenght*) antara sesama kawat fasa, atau antara kawat fasa dengan tanah, yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan atau bias juga disebut gangguan arus lebih. Perhitungan arus gangguan hubung singkat sangat penting untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik pada waktu perencanaan maupun setelah beroperasi nantinya. Perhitungan arus hubung singkat dibutuhkan untuk:

- a. Setelan dan koordinasi peralatan proteksi
- b. Menentukan kapasitas alat pemutus daya
- c. Menentukan rating hubung singkat peralatan-peralatan yang digunakan
- d. Menganalisis sistem jika ada hal-hal yang tidak baik yang terjadi pada waktu sistem sedang beroperasi.
- e. Arus gangguan hubung singkat merupakan aliran arus yang tidak normal (besar) yang disebabkan terjadinya hubungan antara sesama kawat penghantar bertegangan atau antara kawat penghantar bertegangan dengan tanah secara langsung tidak melalui media yang seharusnya (beban/isolator). Oleh karena itu arus hubung singkat dapat dikatakan arus lebih, tetapi arus lebih belum tentu dapat dikatakan arus hubung singkat. Dalam perhitungan arus gangguan hubung singkat untuk proteksi rele cukup dihitung salah satu fasa aja. Pada perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah, nilai impedansi gangguan (Z_f) dianggap nol ($Z_f = 0$).

2.6.2.1 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Gangguan hubung singkat tiga fasa diperlihatkan pada Gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2. 4 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

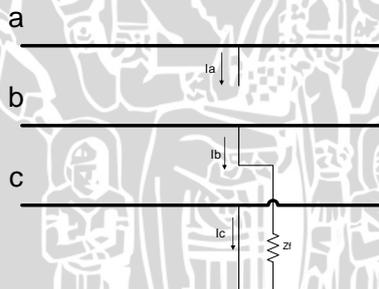
Sumber: Stevenson, 1994:305

Arus hubung singkat tiga fasa adalah (Gonen, T., 1988:267) :

$$I_{hs} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_f} \quad (2.8)$$

2.6.2.2 Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa

Gangguan terjadi pada fasa b dan c. Gangguan hubung singkat antar fasa diperlihatkan pada gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2. 5 Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa

Sumber: Stevenson, 1994:316

Arus hubung singkat antar fasa adalah (Gonen, T., 1988:267) :

$$I_{hs} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.9)$$

dengan :

I_{hs} : Arus hubung singkat (Ampere).

E_a : Tegangan fasa (V)

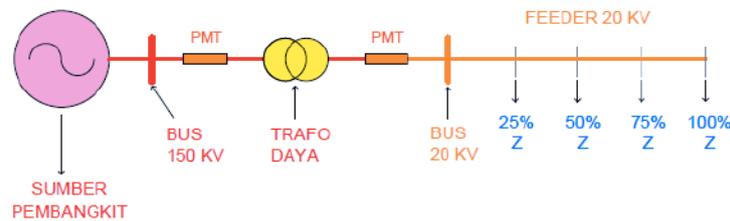
Z_1 : Impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 : Impedansi urutan negatif (ohm)

Z_f : Impedansi gangguan hubung singkat (ohm)

2.7 Perhitungan Impedansi

Perhitungan arus hubung singkat pada dari sistem 20 kV yang dipasok dari gardu induk seperti pada gambar 2.6 dibawah ini,



Gambar 2. 6 Single line diagram jaringan distribusi

Sumber: Sarimun, W., 2011:164

Untuk menghitung arus hubung singkat pada sistem diatas, pertama-tama hitung impedansi sumber (reaktansi) dalam hal ini diambil dari data hubung singkat pada bus 150 kV, kedua menghitung reaktansi transformator tenaga, ketiga menghitung impedansi penyulang.

2.7.1 Perhitungan Impedansi Sumber

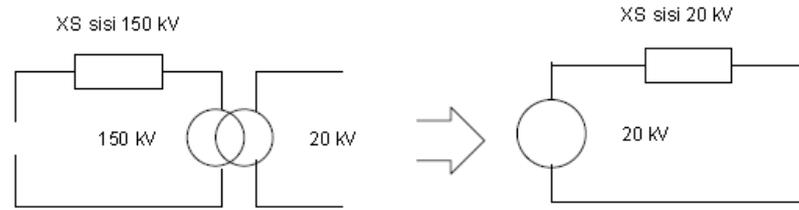
Untuk menghitung impedansi sumber maka data yang diperlukan adalah data hubung singkat pada bus primer trafo. Besar nilai impedansi sumber (trafo) dapat diperoleh dengan menggunakan rumus (Sarimun, W., 2012:164) :

$$X_s = \frac{kV^2}{MVA} \quad (2.10)$$

dengan :

- X_s : Impedansi sumber (ohm)
- kV : Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)
- MVA : Data hubung singkat di bus 150 kV (MVA)

Perlu diingat bahwa impedansi sumber ini adalah nilai ohm pada sisi 150 kV, karena arus hubung singkat yang akan dihitung adalah gangguan hubung singkat di sisi 20 kV, maka impedansi sumber tersebut harus dikonversi dulu ke sisi 20 kV, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 dibawah ini. Sehingga pada perhitungan arus gangguan nanti sudah menggunakan sumber 20 kV. Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak di sisi 150 kV, dilakukan dengan cara sebagai berikut:



Gambar 2. 7 Konversi XS dari 150 kV ke 20 kV

Sumber : Sarimun, W. 2012: 165

Dasar perhitungan untuk mengetahui nilai impedansi sumber pada sisi 20 kV adalah (Sarimun, W., 2012:166):

Daya sisi 150 kV = Daya sisi 20 kV

$$\frac{kV_1^2}{Z_1(\text{sisi } 150 \text{ kV})} = \frac{kV_2^2}{Z_2(\text{sisi } 20 \text{ kV})}$$

$$X_s(\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{20^2}{150^2} X X_s(\text{sisi } 150 \text{ kV}) \tag{2.11}$$

2.7.2 Perhitungan Impedansi Transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahananannya diabaikan karena harganya kecil. Untuk mencari nilai reaktansi trafo dalam ohm dihitung dengan cara sebagai berikut. Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus (Sarimun, W., 2012:166):

$$Z_B = \frac{kV^2}{MVA} \tag{2.12}$$

dengan:

Z_B : Impedansi trafo tenaga pada 100% (ohm)

kV^2 : Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

MVA : Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

Reaktansi urutan positif, negatif ($X_{t1} = X_{t2}$) :

$$X_{t1} = \text{reaktansi trafo (\%)} \times Z_B \tag{2.13}$$

Reaktansi urutan nol trafo tenaga :

Sebelum menghitung reaktansi urutan nol (X_{t0}) terlebih dahulu harus diketahui data trafo tenaga itu sendiri yaitu data dari kapasitas belitan delta yang ada dalam kapasitas trafo:



1. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka :

$$X_{t0} = X_{t1} \quad (2.14)$$

2. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan ΔY dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka :

$$X_{t0} = 3 \times X_{t1} \quad (2.15)$$

3. Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta di dalamnya, maka :

$$X_{t0} = 9 \text{ s/d } 14 \times X_{t1} \quad (2.16)$$

2.7.3 Perhitungan Impedansi Penyulang

Menghitung impedansi penyulang, impedansi penyulang ini dihitung tergantung dari besarnya impedansi per meter penyulang yang bersangkutan, dimana besar nilainya ditentukan dari konfigurasi tiang yang digunakan untuk jaringan SUTM atau dari jenis tabel kabel tanah untuk jaringan SKTM. Dalam perhitungan disini diambil dengan impedansi $Z = (R+jX) \Omega/\text{km}$.

Dalam melakukan penghitungan impedansi penyulang pada penyulang Junrejo yang memiliki satu buah *Recloser*, maka perhitungannya dibagi menjadi dua bagian. Yaitu, bagian mulai dari GI hingga *Recloser* dan dari *Recloser* hingga ujung jaringan.

Dengan demikian nilai impedansi penyulang untuk lokasi gangguan yang dalam perhitungan ini disimulasikan terjadi pada lokasi dengan jarak 1%, 10%, 20%, hingga 100% panjang penyulang baik pada bagian sebelum *Recloser* maupun setelah *Recloser*. Sehingga untuk impedansi penyulang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus (Sarimun, W., 2012:167):

1. Urutan positif dan urutan negatif

$$Z_1 = Z_2 = \text{panjang penyulang (km)} \times Z_1/Z_2 \text{ (ohm)} \quad (2.17)$$

dengan :

Z_1 : impedansi urutan positif (ohm)

Z_2 : impedansi urutan negatif (ohm)

2. Urutan nol

$$Z_0 = \text{panjang penyulang (km)} \times Z_0 \text{ (ohm)} \quad (2.18)$$

dengan :

Z_0 : Impedansi urutan nol (ohm)

2.7.4 Perhitungan Impedansi Ekuivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekuivalen positif (Z_{1eki}), negatif (Z_{2eki}), dan nol (Z_{0eki}) dari titik gangguan sampai ke sumber sesuai dengan urutan diatas. Karena dari sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan Z_{1eki} dan Z_{2eki} dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z_{0eki} dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi Z_{0eki} ini, harus diketahui dulu hubungan belitan trafonya. Sehingga untuk impedansi ekuivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus (Sarimun, W., 2012:168):

1. Urutan positif dan urutan negatif ($Z_{1eki} = Z_{2eki}$)

$$Z_{1eki} = Z_{2eki} = (n\% \times R_{1jar}) + j (X_{SC} + X_T + (n\% \times X_{1jar})) \quad (2.19)$$

dengan:

Z_{1eki}	: impedansi ekuivalen jaringan urutan positif (ohm)
Z_{2eki}	: impedansi ekuivalen jaringan urutan negatif (ohm)
X_s (sisi 20 kV)	: impedansi sumber sisi 20 kV (ohm)
X_{t1}	: impensi trafo tenaga urutan positif dan negatif (ohm)
R_{1jar}	: tahanan jaringan (ohm)

2. Urutan nol

$$Z_{0eki} = (3 RN + (n\% \times R_{0jar})) + j (X_{0T} + (n\% \times X_{0jar})) \quad (2.20)$$

dengan:

Z_{0eki}	: impedansi ekuivalen jaringan nol (ohm)
Z_{t0}	: impedansi trafo tenaga urutan nol (ohm)
RN	: tahanan tanah trafo tenaga (ohm)
Z_0	: impedansi urutan nol (ohm)

Karena lokasi gangguan diasumsikan terjadi pada 10%, 20%, 30%, hingga 100% panjang penyulang, maka Z_{1eki} , Z_{2eki} , dan Z_{0eki} yang didapat juga pada lokasi tersebut. Setelah mendapatkan impedansi ekuivalen sesuai dengan lokasi gangguan, selanjutnya perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar seperti dijelaskan sebelumnya, hanya saja impedansi ekuivalen mana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah tergantung dari hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah.

2.8 Sistem Pengamanan Jaringan Distribusi 20 kV

Jaringan distribusi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik kepada konsumen/pelanggan. Karena fungsinya tersebut, maka keandalan menjadi sangat penting dan untuk itu jaringan distribusi perlu dilengkapi oleh alat pengamanan.

Pada dasarnya semua konstruksi jaringan distribusi tidak ada yang benar-benar aman dari gangguan yang datangnya dari dalam sistem itu sendiri maupun dari luar sistem. Gangguan tersebut merupakan potensi yang merugikan ditinjau dari beberapa hal, maka perlunya dipasang sistem proteksi yang berfungsi sebagai berikut:

Ada tiga fungsi sistem pengamanan dalam jaringan distribusi, antara lain:

- Mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan beserta peralatannya dari akibat adanya gangguan listrik
- Menjaga keselamatan umum dari akibat gangguan listrik
- Meningkatkan kelangsungan pelayanan tenaga listrik kepada konsumen

Pada sistem distribusi 20 kV hal yang terpenting pada sistem proteksi selain alat proteksi itu sendiri, sistem pentanahan juga merupakan bagian yang tidak terpisahkan dalam sistem proteksi itu sendiri. Misalnya ada gangguan fasa yang bocor ke tanah, maka bila sistem pentanahan tidak sesuai dengan sistem distribusi yang diproteksi, maka alat proteksi tidak akan bekerja dengan benar, sehingga dapat merusak peralatan jaringan maupun membahayakan keselamatan manusia.

2.9 Peralatan Pengaman Arus Lebih

Fungsi dari peralatan arus lebih adalah untuk mengatasi gangguan arus lebih yang ada pada sistem distribusi sebelum gangguan tersebut meluas keseluruh sistem yang ada. Peralatan yang banyak digunakan sebagai pengamanan arus lebih antara lain :

- Penutup Balik Otomatis (PBO) atau *Recloser*
- Rele Arus Lebih atau *Over Current Relay (OCR)*

2.9.1 Penutup Balik Otomatis (PBO) atau *Recloser*

Sebagian besar gangguan (80-95%) pada jaringan distribusi dan transmisi adalah bersifat temporer (sementara), berlangsung dari beberapa *cycle* sampai beberapa detik. Penyebab gangguan kebanyakan disebabkan oleh dahan ranting pohon yang mengenai saluran udara (Kadarisman, 2010 yang dikutip dari penelitian yang dilakukan oleh Dhipaatmaja, 2012:25).

Recloser merupakan suatu peralatan pengamanan arus lebih, karena hubung singkat antara fasa dengan fasa atau fasa dengan tanah, dimana *recloser* ini memutus arus dan

menutup kembali secara otomatis dengan selang waktu yang dapat diatur sesuai dengan setting interval *recloser* untuk membebaskan sistem dari gangguan yang bersifat temporer maupun permanen.

Pada suatu gangguan permanen, *recloser* berfungsi memisahkan daerah atau jaringan yang terganggu pada gangguan sesaat, *recloser* akan memisahkan daerah gangguan sesaat sampai gangguan tersebut dianggap hilang, dengan demikian *recloser* akan masuk kembali sesuai settingannya sehingga jaringan akan aktif kembali secara otomatis.

Recloser hampir sama dengan circuit breaker, namun *recloser* dapat disetting untuk bekerja membuka dan menutup beberapa kali secara otomatis. Apabila *feeder* mendapat gangguan sementara, bila *circuit breaker* yang digunakan untuk *feeder* yang mendapat gangguan sementara, akan menyebabkan hubungan feeder terputus. Tetapi jika *recloser* yang digunakan, diharapkan gangguan sementara tersebut tidak membuat *feeder* terputus, maka *recloser* akan bekerja beberapa kali sampai akhirnya *recloser* terbuka.

1. Cara Kerja *Recloser*

Waktu membuka dan menutup *recloser* (Silaban, 2009 yang dikutip dari penelitian yang dilakukan oleh Dhipaatmaja, 2012:26) :

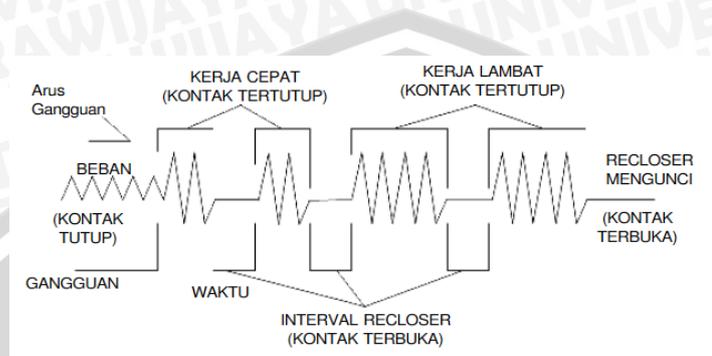
1. Arus yang mengalir normal bila tidak terjadi gangguan
2. Ketika terjadi sebuah gangguan, arus yang mengalir melalui *recloser* membuka kontak pada *recloser*.
3. Kontak *recloser* akan menutup kembali setelah beberapa detik, sesuai setting yang ditentukan. Tujuan memberikan selang waktu adalah member kesempatan agar gangguan tersebut hilang dari sistem, terutama gangguan yang bersifat temporer.
4. Apabila yang terjadi adalah gangguan permanen, maka *recloser* akan membuka dan menutup balik sesuai setting yang ditentukan dan kemudian *lockout*.
5. Setelah gangguan permanen dibebaskan oleh petugas, baru dapat dikembalikan pada keadaan normal.

2. Prinsip Penyetelan *Recloser*

Recloser dapat disetel untuk beberapa kali operasi. Penyetelan untuk jumlah operasi dilakukan dengan memutar setting *lockout* yang terdapat pada panel kontrol elektronik. *Recloser* dapat disetting beberapa kali interval penutupnya dan masing-masing interval memiliki waktu yang berbeda sesuai dengan gambar 2.8.

Untuk *recloser* pengaturan hidrolis tiga fasa yang selang waktu penutupan standar 2 s. pada *recloser* pengaturan elektronik waktu penutupan lebih besar dapat deprogram dalam rangkaian pengaturannya.

Beberapa pilihan waktu penutupan baik *recloser* dapat dibuat, hal ini sangat dipengaruhi oleh koordinasinya pada peralatan pengamannya yang lain.



Gambar 2. 8 Bentuk Buka Tutup Hingga Terkunci pada Recloser

Sumber: Sarimun, W., 2011:207

1. Penutup balik seketika, artinya setelah kontak *recloser* membuka karena gangguan maka dengan waktu yang singkat kontak tersebut akan menutup kembali.
2. Menutup baik setelah dua detik artinya setelah kontak *recloser* membuka karena gangguan, maka selang dua detik kemudian kontak *recloser* akan menutup balik. Selang dua detik ini diharapkan sudah cukup untuk menghilangkan adanya gangguan transien dan menghilangkan adanya ionisasi gas. Bila digunakan diantara operasi fast trip, maka dua detik ini sudah cukup untuk mendinginkan sekring di sisi beban.
3. Menutup balik setelah lima detik, ini dimaksudkan agar dapat memberikan kesempatan sekring untuk dingin kembali sehingga tidak sampai titik leleh minimumnya. Dan dipakai juga untuk selang waktu penutup operasi diperlambat pada *recloser* di gardu induk untuk mendinginkan sekring di sisi tegangan tinggi.
4. Menutup balik setelah sepuluh detik, lima belas detik dan seterusnya atau dikenal sebagai *longer recloser interval*, pada umumnya digunakan apabila pengaman cadangannya adalah pemutus tenaga yang dikontrol dengan rele.

2.9.2 Rele Pengaman

Pada dasarnya rele proteksi terdiri dari sebuah elemen operasi dan seperangkat kontak. Elemen operasi menerima arus dari transformator arus ataupun tegangan dari dari transformator tegangan atau kombinasi dari keduanya.

Dalam beberapa kasus rele melakukan pengukuran atau perbandingan operasi dasar input dan mengubahnya dalam bentuk gerakan kontak. Keadaan keluarana dari rele adalah menutup (*close*) dan ditahan (*block*). Jika keadaan tertutup maka rele akan memberikan sinyal untuk melakukan proses pembukaan dan circuit breaker dimana pada gilirannya akan mengisolasi gangguan dari bagian sistem tenaga listrik lain yang sehat.

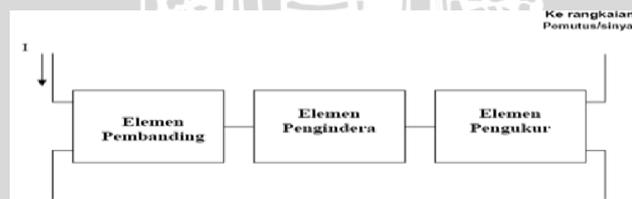
Di dalam penyetelan sebuah rele harus dilakukan dengan benar agar tidak terjadi kesalahan operasi pada saat terjadi gangguan. Oleh karena itu hal-hal yang mempengaruhi dalam penyetelan rele harus benar-benar diperhatikan sesuai dengan gambar 2.9 (Wahyudi, 2011 yang dikutip dalam penelitian yang dilakukan oleh Dhipaاتمaja, 2012:31):



Gambar 2. 9 Skema Konsep Kerja Rele

Sumber: Dhipaاتمaja, 2012:31

Rele pengaman biasanya dipisahkan menjadi tiga elemen dasar seperti terlihat pada gambar 2.10:



Gambar 2. 10 Bagan Elemen Dasar Rele Pengaman

Sumber: Dhipaاتمaja, 2012:31

a. Elemen pembanding

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

besaran dari elemen pengindera dan membandingkan dengan besar arus penyetelan dan kerja rele.

b. Elemen pengindera

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

c. Elemen pengukur

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

2.9.2.1 Rele Arus Lebih

Rele merupakan peralatan pengaman yang dipasang pada peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik dari gangguan yang mungkin terjadi. Tujuan dipasang relai pengaman adalah :

- Menghindari atau mengurangi kerusakan yang terjadi akibat gangguan pada alat yang dilalui arus gangguan.
- Menyelamatkan sistem atau bagian sistem lainnya yang tidak terganggu supaya tetap dapat bekerja terus, dengan cara melepaskan bagian sistem yang terganggu sedemikian rupa sehingga penyimpangan atau kesalahan akibat gangguan tersebut tidak memberikan akibat nefatif yang lebih luas terhadap sistem keseluruhan yang ada

Peralatan proteksi harus dirancang sedemikian rupa sehingga gangguan dapat dengan segera diputuskan atau dihilangkan. Suatu gangguan yang serius dapat menyebabkan pemutusan yang cepat dan dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan. Gangguan yang terjadi secara tidak langsung harus diketahui oleh operator sehingga peralatan dapat dioperasikan di luar daerah kritis. Kejadian-kejadian yang sangat berbahaya bagi operasi generator ataupun transformator adalah hubung singkat, gangguan ke tanah, penguatan kurang, arus lebih dan panas berlebihan.

Rele pengaman merupakan bentuk dasar dari peralatan listrik otomatis dan sangat perlu kerja dari sistem distribusi daya yang modern bahkan tergantung padanya. Bila terjadi gangguan baik berupa arus, tegangan, frekuensi dan daya, rele pengaman akan mendeteksi dan memutuskan bagian yang mengalami gangguan dari sistem. Selanjutnya akan mengembalikan ke keadaan normal atau membangkitkan sinyal peringatan kepada operator.

Rele jenis ini adalah besarnya arus yang masuk ke dalam rele, atau rele arus lebih. Rele ini memberikan reaksi terhadap besarnya arus masukan, dan bekerja untuk memutuskan bilamana besarnya arus melebihi nilai tertentu yang dapat diatur. Rele arus lebih akan menutup kontak-kontaknya untuk menggerakkan rangkaian yang menyebabkan terjadinya saklar daya membuka atau menutup. Bilamana arus mencapai nilai yang sudah ditentukan terdahulu sedemikian rupa. Dengan begitu, maka pada rele arus lebih terdapat kepekaan terhadap besar arus yang mengalir.

Rele arus lebih dikategorikan menjadi tiga yaitu :

- Rele arus lebih seketika (*instantaneous over current relay*)
- Rele arus lebih dengan karakteristik tunda waktu (*definite time over current relay*)
- Rele arus lebih dengan karakteristik tunda waktu terbalik (*inverse time over current relay*)

Rele arus lebih seketika adalah rele yang bekerjanya tanpa penundaan waktu atau jangka waktu relay mulai saat rele arusnya *pick up* sampai selesai, sangat singkat (sekitar 20 ms sampai 100ms).

Rele arus lebih dengan karakteristik tunda waktu tertentu, yaitu suatu rele dengan jangka waktu mulai rele arus *pick up* sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai atau waktu tertentu. Sehingga apabila arus yang mengalir telah melebihi arus setting maka rele akan bekerja sesuai dengan waktu penundaan yang telah ditetapkan. Ada beberapa jenis rele arus lebih dengan tunda waktu, hal ini sangat bergantung pada karakteristik waktu tundanya. Berdasarkan tunda waktu kerjanya, rele lebih dapat dibedakan menjadi tiga, yakni (Sarimun, W., 2011:28) :

- Waktu tertentu (*definite time*)
- Sangat berbanding terbalik (*very inverse*)
- Sangat berbanding terbalik sekali (*extremely inverse*)

a. Prinsip kerja Rele Arus Lebih

Rele arus lebih merupakan suatu jenis rele yang bekerja berdasarkan besarnya arus masukan, dan apabila besarnya arus masukan melebihi suatu harga tertentu yang dapat diatur (I_p) maka rele arus lebih bekerja. Dimana I_p merupakan arus kerja yang dinyatakan menurut gulungan sekunder dari trafo arus (CT). bila suatu gangguan terjadi di dalam daerah perlindungan rele, besarnya arus gangguan I_f yang juga dinyatakan terhadap gulungan sekunder CT juga. Rele akan bekerja apabila memenuhi keadaan sebagai berikut (Wahyudi, 2011 yang dikutip dalam penelitian yang dilakukan oleh Dhipaatmaja, 2012:32):

$I_f > I_p$ Rele bekerja (trip)

$I_f < I_p$ tidak bekerja (blok)

b. Dasar Penyetelan Rele Arus Lebih

Pada dasarnya rele arus lebih berfungsi sebagai pengaman gangguan hubung singkat, tetapi dalam beberapa hal dapat berfungsi sebagai pengaman beban lebih. Fungsi rele ini disamping sebagai pengaman utama untuk seksi yang diamankan juga berfungsi sebagai pengaman cadangan pada seseksi berikutnya. Hal ini apabila rele arus lebih dipakai pada sistem distribusi tegangan menengah. Namun untuk saluran transmisi tegangan tinggi rele arus lebih berfungsi sebagai pengaman cadangan (*backup*) (Anderson, 1998 yang dikutip dalam penelitian yang dilakukan oleh Dhipaatmaja, 2012:32).

Mengingat gangguan yang terjadi pada saluran transmisi adalah gangguan hubung singkat fasa ke tanah, maka penyetelan juga berbeda sehingga akan diuraikan kriteria penyetelan untuk gangguan fasa dan gangguan tanah secara terpisah.

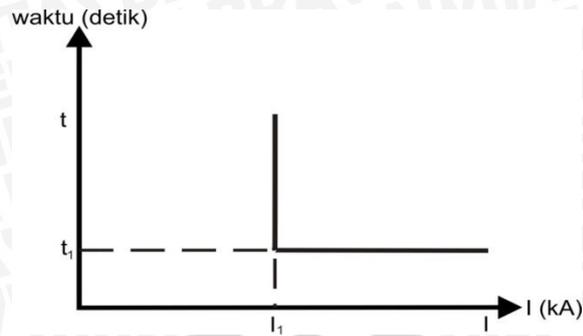
Untuk operasi yang selektif, apabila terdapat beberapa rele arus lebih pada suatu jaringan radial. Maka rele pada ujung yang terjauh dari sumber harus disetel untuk dapat bekerja pada waktu yang sesingkat mungkin. Untuk jenis rele arus lebih karakteristik inverse, setelan waktunya ditentukan pada saat arus gangguan maksimum.

2.9.2.2 Karakteristik Rele Arus Lebih

Berdasarkan karakteristik waktunya rele arus lebih dibedakan atas 3 jenis, yaitu:

A. Rele Arus Lebih *Instant*

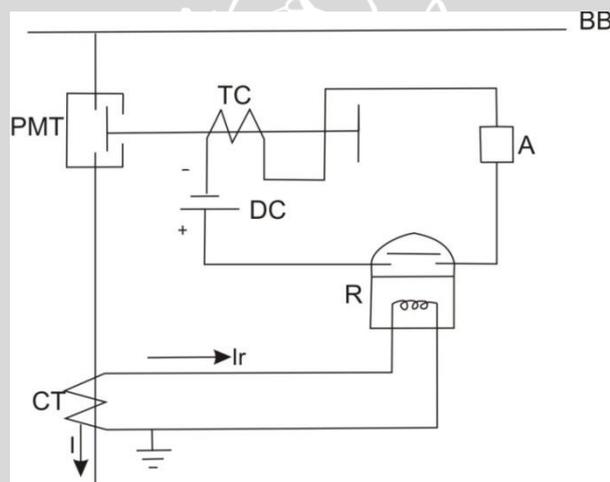
Prinsip kerja rele jenis ini adalah tanpa penundaan waktu, tapi masih bekerja dengan waktu cepat sebesar 0,1 detik, pada umumnya kurang dari 0,08 detik (Sarimun, W., 2012:29), seperti pada gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Karakteristik Rele Arus Lebih Instant

Sumber : Setiyo Saksomo, tanpa tahun : 29

Bekerjanya rele ini didasarkan besarnya arus gangguan hubung singkat yang dipilih. Pada setelan koordinasi proteksi di sistem distribusi tegangan menengah disebut dengan sistem moment/instant. Misal saat terjadi gangguan hubung singkat, membukanya CB dalam waktu cepat sekali (80 mili detik), berarti gangguan hubung singkat yang terjadi adalah dengan arus yang sangat besar.



Gambar 2. 12 Rangkaian Rele Arus Lebih Dengan Karakteristik Instant

Sumber : Setiyo Saksomo, tanpa tahun : 29

Gambar 2.12 di atas adalah rangkaian rele arus lebih dengan karakteristik instant dimana bila karena adanya suatu hal sehingga arus yang mengalir melebihi harga yang diijinkan, maka harga I_r yang keluar dari sisi sekunder transformator arus juga akan naik melebihi dari arus setting rele sehingga rele bekerja. Kerja rele ini ditandai dengan menutupnya rangkaian rele. Karena merupakan rangkaian tertutup maka dengan adanya sumber tegangan dc maka tripping coil akan menarik kontak CB, sehingga CB terbuka. Untuk mengetahui bekerjanya rele, maka sering digunakan lampu indicator atau sinyal S yang dipasang antara rele dan tripping coil.

Pada penerapannya, rele arus lebih waktu invers kurang efektif dalam mengamankan gangguan. Hal ini karena semakin dekat gangguan yang terjadi dengan sumber, maka arus gangguan yang mengalir akan semakin besar, namun waktu pemutusan gangguan tersebut terlalu lama. Sedangkan tingkat keamanan sistem proteksi dinilai dari seberapa cepat sistem proteksi dapat memutus gangguan. Oleh sebab itu, perlu ditambahkan bantuan rele arus lebih instan sehingga menghasilkan sistem proteksi yang lebih baik, karena rele arus lebih instan tanpa perlambatan waktu. Dalam aplikasinya di sistem pengamanan suatu jaringan tenaga listrik biasanya rele arus lebih waktu instan dikombinasikan dengan rele arus lebih invers (Horowitz, S. dan Phadke, Arum G, 2008 yang dikutip dalam penelitian oleh Dhipaatmaja, 2012:33). Maka koordinasi antara satu dan seksi lainnya untuk mendapatkan selektifitas didasarkan tingkat beda arus (*current grading*). Penyetelan rele ini adalah (Sarimun, W., 2012:28) :

a. Setelan Arus Pada Bagian Sekunder

Besarnya setelan arus pada bagian sekunder sebesar :

$$I_{\text{instansekunder}} = \frac{I_{\text{instan}}}{I_{\text{set primer}}} \quad (2.21)$$

Dengan :

$I_{\text{instansekunder}}$: Setelan arus instan pada bagian sekunder (Ampere).

$I_{\text{set primer}}$: Setelan arus pada bagian primer (Ampere).

I_{instan} : Setelan arus instan (Ampere).

Dengan setelan arus instan sebagai berikut :

1) Untuk setelan disisi penyulang, dengan arus maksimum adalah :

- Trafo kapasitas 60 MVA maksimum $2,0 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 50 MVA maksimum $2,2 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 30 MVA maksimum $2,4 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 20 MVA maksimum $2,6 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 16 MVA maksimum $3,0 \times I_{n \text{ trafo}}$
 - Trafo kapasitas 10 MVA maksimum $3,2 \times I_{n \text{ trafo}}$
- (2.22)

2) Untuk setelan disisi masukan 20 kV, disetelan sebesar :

$$I_{\text{instan}} = 4 \times I_{n \text{ trafo}} \quad (2.23)$$

Dengan :

$I_{n \text{ trafo}}$: Arus nominal transformator daya (Ampere).

Untuk menghitung arus nominal transformator daya menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_{n \text{ trafo}} = \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \times \text{kV}_{L-L}} \quad (2.24)$$

b. Setelan Arus Pada Bagian Primer

Besarnya setelan arus pada bagian primer sebesar :

$$I_{\text{instan primer}} = I_{\text{instan sekunder}} \times I_{\text{set primer}} \quad (2.25)$$

Dengan :

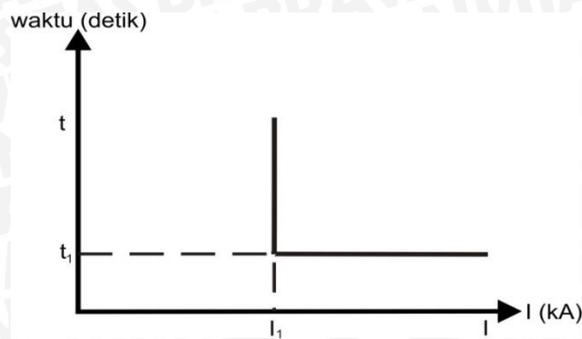
$I_{\text{instan primer}}$: Setelan arus instan pada bagian primer (Ampere).

Untuk penyetelan waktu rele arus lebih seketika disisi penyulang berkisar antara 40 sampai dengan 100 milidetik, sedangkan untuk sisi masukan 20 kV penyetelan waktunya lebih besar dari penyetelan waktu sisi penyulang (Sarimun, W., 2012:29).

B. Rele Arus Lebih *Definite*

Setelah proteksi dengan menggunakan karakteristik *definite time* yang di *setting* pada rele hanya didasarkan pada waktu kerjanya proteksi dengan tidak melihat besarnya arus gangguan. Kurva rele arus lebih dengan karakteristik *definite* dapat dilihat pada gambar berikut:

Gambar 2.13 menunjukkan karakteristik waktu dan arus rele definite, dengan ts merupakan setting waktu sesuai setelan. Keuntungan dari karakteristik definite adalah koordinasinya mudah dan waktu kerjanya tidak tergantung pada perubahan kapasitas pembangkit (Sarimun, W., 2012:29). Disamping keuntungan adapula kerugiannya, yaitu terjadinya kumulasi waktu pada rele dihulu. Untuk sistem yang besar, arus gangguan besar dalam hal ini kumulatif waktu tidak digunakan.



Gambar 2. 13 Karakteristik Arus Lebih Definite

Sumber: Setiyo Saksomo, tanpa tahun: 29

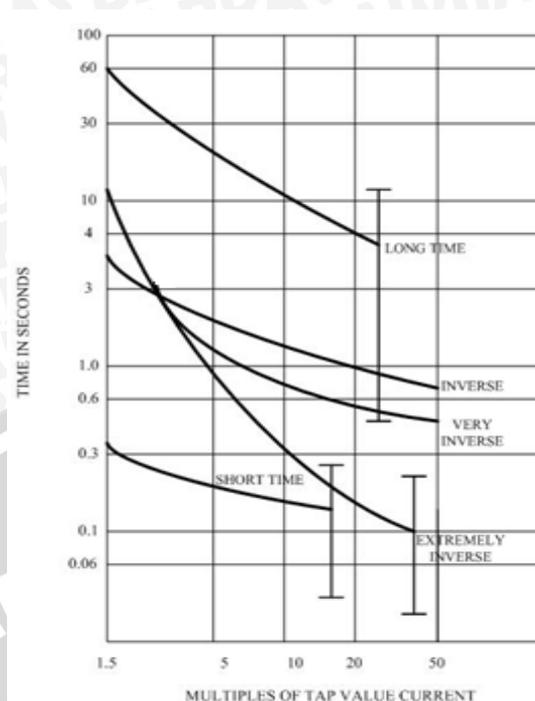
C. Rele Arus Lebih *Inverse*

Setelan proteksi dengan menggunakan karakteristik inverse time rele, karakteristik grafiknya terbalik antara arus dan waktu, dimana semakin besar arus gangguan hubung singkat maka semakin kecil waktu yang dibutuhkan untuk membuka pemutus (PMT) sehingga dalam settingnya nanti rele jenis ini perlu mengetahui besarnya arus hubung singkat untuk tiap seksi di samping arus nominal serta kurva karakteristik rele. Cara kerja *inverse* rele adalah sebagai berikut (Sarimun, W., 2008:31):

1. Rele mulai *pick up* pada arus gangguan $> I_{set}$
2. Bila perbandingan antara arus gangguan dan setelan arus $> I$, maka elemen waktu mulai menghitung.
3. Hitungan waktu selesai bila kontak menutup, dan lamanya tergantung besarnya perbandingan arus itu. Makin besar arus, makin cepat kerja rele.
4. Setelan waktu dilakukan dengan Time Dial (t_d) untuk rele elektromekanik atau *Time Multiplier Setting* (TMS untuk rele static)
5. Dengan setelan t_d yang tetap, perubahan setelan arus akan mempengaruhi waktu kerja rele.

Adapun karakteristik rele arus lebih terbalik berdasarkan standard IEC 60255-3 dan BS 142 dapat dilihat pada gambar 2.14 dibawah ini, dimana dalam gambar tersebut menunjukkan besarnya arus gangguan dan waktu unjuk kerja yang biasanya disebut *time dial*. Semakin besar *time dial* maka semakin lama pula waktu operasi rele ini.

Karakteristik invers ini banyak dikenal dengan sebutan *inverse definite minimum time* (IDMT). Karena seiring dengan arus yang bertambah besar, waktu operasi turun semakin cepat seolah mendekati waktu definite minimumnya.



Gambar 2. 14 Karakteristik Operasi Relay Invers Time

Sumber: Anonymous, 2002

Penyetelan Arus Setelan Rele Arus Lebih jenis *Inverse* sebagai berikut:

1. Arus Setelan (*Setting*) Primer Rele Arus Lebih Jenis *inverse*

Rele jenis *inverse* biasa diset sebesar 1,05 s/d 1,1 x I_n (Sarimun, W., 2012:194). maka besarnya arus setelan rele arus lebih jenis *inverse* pada bagian primer adalah sebesar:

$$I_P = 1,05 \times I_n \quad \text{Ampere} \quad (2.25)$$

Dimana :

I_P : Arus setelan (*setting*) pada bagian primer (Ampere)

I_n : Arus nominal peralatan (Ampere)

2. Arus Setelan (*Setting*) Sekunder Rele Arus Lebih Jenis *inverse*

Arus Setelan (*setting*) sekunder rele arus lebih jenis *inverse* pada bagian sekunder sebesar:

$$I_S = I_P \times \frac{1}{Rasio_{CT}} \quad \text{A} \quad (2.26)$$

Dimana:

I_S : Arus setelan (*setting*) pada bagian sekunder (Ampere)

n_{CT} : Perbandingan ratio trafo arus (CT)

Penyetelan *Time Multiple Setting* (TMS) Rele Arus Lebih Jenis *Inverse* sebagai berikut:

Setelan (*setting*) waktu rele arus lebih jenis *inverse* dihitung menggunakan rumus kurva waktu dengan arus adalah seperti persamaan berikut (Sarimun, W., 2012:195):

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS \text{ Detik} \quad (2.27)$$

Dimana:

t : waktu kerja dari rele arus lebih jenis *inverse*

TMS : *Time Multiple Setting* (setelan waktu yang diinginkan)

I_s : Arus setelan rele arus lebih jenis *inverse* primer (Ampere)

I_{fault} : Arus gangguan (Ampere)

Maka nilai TMS pada Rele Arus Lebih dapat dicari dengan menggunakan

persamaan:
$$TMS = \frac{\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_s}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t \quad (2.28)$$

Untuk menentukan nilai TMS yang akan disetkan pada rele arus lebih sisi *incoming* transformator tenaga yaitu arus hubung singkat $I_{f3\text{fasa}}$ di bus 20 kV, sedangkan untuk sisi 150 kV diambil arus hubung singkat $I_{f3\text{fasa}}$ disisi 150 kV.

2.10 Dasar Penyetelan Rele

2.10.1 Batas Minimum

Batas penyetelan minimum dinyatakan bahwa rele arus lebih tidak boleh bekerja pada saat terjadi beban maksimum (PLN, Dinas Proteksi:14).

2.10.2 Batas Maksimum

Batas penyetelan maksimum rele arus lebih adalah bahwa rele harus bekerja bila terjadi gangguan hubung singkat pada rele seksi berikutnya. Dalam penyetelan maksimum rele perlu memperhitungkan arus hubung singkat maksimum yang melewati rele. Suatu gangguan hubung singkat tiga fasa pada pembangkit maksimum akan memberikan suatu arus gangguan maksimum dan gangguan hubung singkat antar fasa akan memberikan arus gangguan minimum. Rele arus lebih harus memberikan reaksi terhadap kedua kondisi ini.

2.10.3 Dasar Penyetelan Waktu Kerja

2.10.3.1 Rele Paling Hilir

Penyetelan untuk rele arus lebih waktu tertentu ialah 0,2-0,3 detik, sedangkan untuk rele arus lebih waktu terbalik dipilih *time dial* yang terkecil yang didasarkan pada pembangkit maksimum.

2.10.3.2 Rele Satu Seksi di Hulunya

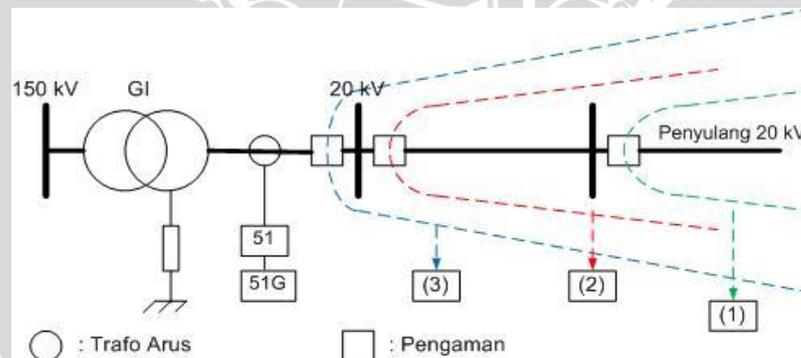
Penyetelan waktu kerja rele satu seksi di hulunya didasarkan bahwa rele yang berdekatan harus selektif.

2.11 Daerah Pengamanan

Untuk memperoleh tingkat selektifitas yang tinggi, dimana hanya bagian sistem yang terganggu saja yang diisolasi (mengalami pemutusan), maka pada sistem proteksi dibentuk daerah-daerah pengamanan. Daerah pengamanan akan memberikan suatu pengertian mengenai batas daerah bagi sistem pengamanan. Sehingga suatu sistem pengamanan akan memberikan respon terhadap gangguan yang terjadi didaerahnya dan memberikan perlindungan terhadap gangguan tersebut.

Daerah pengamanan distribusi dapat dilihat pada gambar 2.15 dibawah ini, dimana dalam gambar tersebut merupakan suatu sistem tegangan menengah yang terdiri dari satu transformator, satu saluran distribusi dan tiga buah busbar yang digambarkan dalam diagram segaris. Garis terputus-putus tersebut menunjukkan pembagian sistem tenaga listrik ke dalam tiga daerah pengamanan.

Batas setiap daerah menentukan bagian sistem tegangan menengah sehingga untuk gangguan yang terjadi di dalam daerah tersebut, sistem pengamanan yang bertanggung jawab akan bertindak untuk memisahkan semua gangguan yang berada dalam daerah itu. Karena pemisahan dalam keadaan terganggu dilakukan oleh pemutus rangkaian, maka pada setiap titik hubungan antara peralatan di dalam daerah pengamanan satu dengan bagian lainnya dari sistem harus menyisipkan pemutus rangkaian. Dengan kata lain, pemutus rangkaian membantu menentukan batas daerah pengamanan.



Gambar 2. 15 Daerah Pengamanan Distribusi

Sumber: Sarimun, W., 2012:9

Pada gambar 2.15 pengamanan distribusi tenaga listrik sistem tegangan menengah terbagi sebagai berikut :

1. Daerah pengamanan listrik mempergunakan *Recloser*, *Fuse cut out* atau SSO.
2. Daerah pengamanan listrik lokasi di sumber listrik Gardu Induk atau pusat listrik mempergunakan rele arus lebih dan rele gangguantanah (keluaran penyulang).

3. Daerah pengaman listrik di sumber listrik Gardu Induk atau pusat listrik mempergunakan rele arus lebih dan rele gangguan tanah (masukan penyulang).

2.12 Koordinasi Pengaman

Pengertian koordinasi pengaman yaitu terdapat dua jenis atau lebih peralatan proteksi diantara titik kesalahan/gangguan. Peralatan ini harus dikoordinasikan untuk memastikan bahwa peralatan yang berada di titik terdekat dengan gangguan harus dioperasikan terlebih dahulu. Kegagalan pada proteksi utama harus dapat diatasi, yaitu dengan proteksi cadangan (*back up protection*). Proteksi cadangan ini umumnya mempunyai perlambatan waktu (*time delay*), hal ini untuk memberikan kesempatan kepada proteksi utama beroperasi terlebih dahulu, dan jika proteksi utama gagal baru proteksi cadangan yang akan beroperasi. Hal ini disebut koordinasi selektif, dimana merupakan kemampuan untuk menentukan pada titik mana terjadinya gangguan, sehingga dapat ditentukan dengan tepat pemutus daya yang harus dibuka. Dengan demikian hanya bagian yang mengalami gangguan saja yang dipisahkan atau diisolasi dari sistem tersebut. Rele pengaman dengan kemampuan selektif yang baik dibutuhkan untuk mencapai keandalan sistem yang tinggi karena tindakan pengaman yang cepat dan tepat akan dapat memperkecil gangguan menjadi sekecil mungkin. Syarat yang diperlukan pada peralatan proteksi harus menilai atau menentukan pada saat beroperasi harus melihat pada nilai minimal arus lebih, nilai minimal waktu dan tetap pada kondisi selektif dari peralatan lain dalam suatu sistem sehingga setelan arus dan setelan waktu yang digunakan rele pengaman sangat diperlukan untuk menentukan respon bekerja dengan cepat apabila terjadi gangguan agar gangguan tersebut tidak menyebar merusak peralatan yang lain dari sistem.

Dengan mengacu pada konsep daerah pengaman, maka setelan rele arus lebih memiliki peranan yang penting dalam koordinasi rele pengaman. Setelan rele arus lebih dapat dilakukan berdasarkan setelan waktu, setelan arus maupun kombinasi keduanya (IEEE *Standart* 242-1986).

Koordinasi ini adalah untuk menentukan *time delay* pada pengaman antara rele pengaman utama dan rele pengaman cadangan tidak boleh bekerja secara bersamaan. Untuk itu diperlukan *time delay* antara rele utama dan rele cadangan adalah 0,4-0,5 detik. Dengan spesifikasi sebagai berikut :

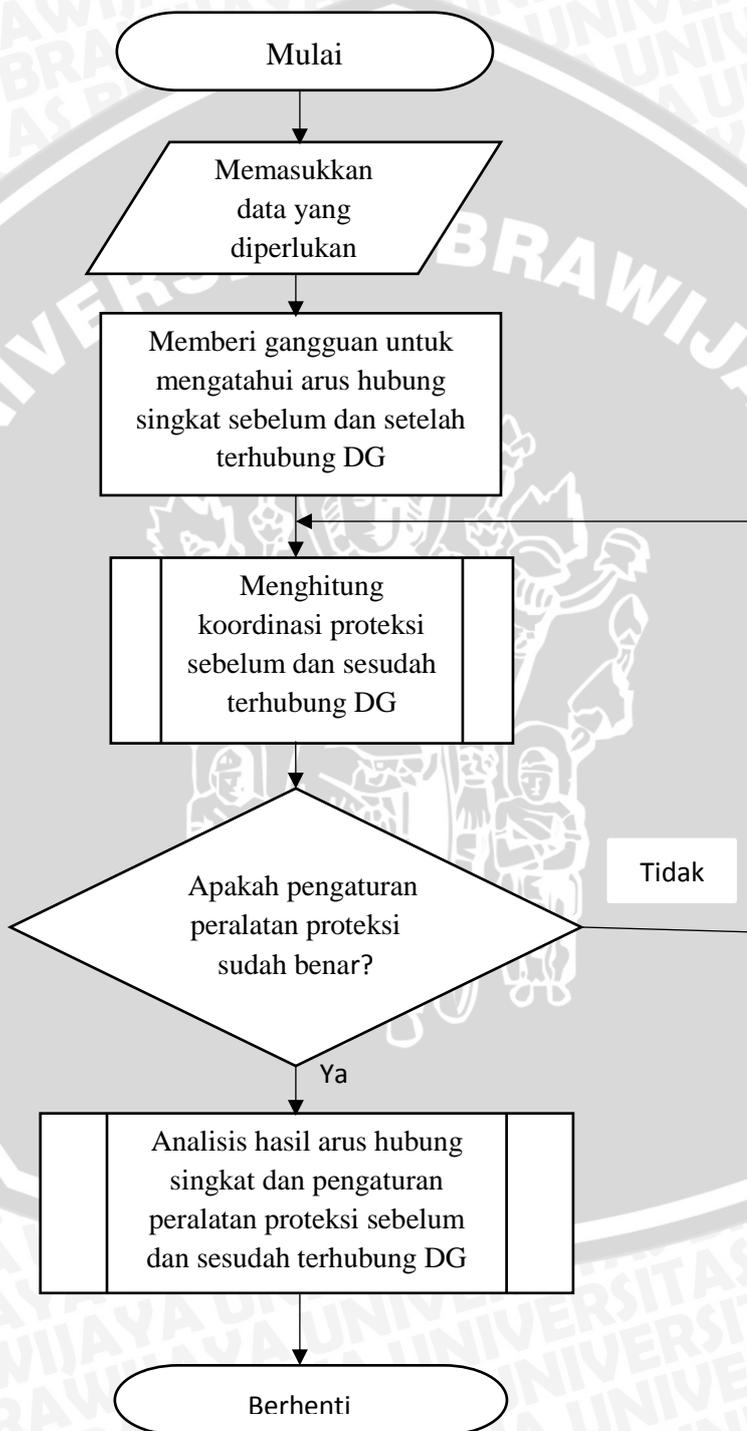
- Kesalahan rele waktu pada kedua rele waktu yang berurutan 0,2-0,3 detik.
- *Overshoot* 0,05 detik dan Faktor keamanan 0,05 detik.
- Waktu pembukaan pemutus tenaga maksimum 0,1 detik.

BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang akan digunakan untuk mencapai tujuan dari penelitian ini memiliki langkah - langkah seperti terlihat pada gambar 3.1.:

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.2 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah untuk mempelajari dan memahami konsep yang terkait dengan masalah analisis impedansi urutan sistem, perhitungan arus hubung singkat, dan pengaturan rele arus lebih. Besar perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, berpengaruh terhadap setelan rele arus lebih.

3.3 Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang berasal dari buku referensi, jurnal, dan penelitian yang relevan dengan pembahasan skripsi ini. Data tersebut meliputi :

- a) Gambar *Single Line Diagram*
- b) Data spesifikasi peralatan transformator daya III GI Sengkaling dan spesifikasi generator *Distributed Generation*
- c) Data pembebanan transformator daya III GI Sengkaling
- d) Daya *Distributed Generation*
- e) Data peralatan proteksi Data spesifikasi peralatan proteksi rele arus lebih dan recloser pada GI Sengkaling dan penyulang Pujon

3.4 Pemodelan dan Simulasi

Setelah mendapatkan data-data dan setelan rele arus lebih dan *recloser* maka dilakukan perhitungan arus hubung singkat dan penyetelan waktu rele arus lebih serta *recloser*. Dalam penelitian ini dilakukan permodelan sistem distribusi 20 kV pada penyulang Pujon dalam bentuk *single line diagram*.

3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan diambil berdasarkan analisis perhitungan sistem proteksi dengan metode dan tinjauan pustaka yang digunakan serta pembahasan yang mengacu pada rumusan masalah. Setelah kesimpulan diambil maka saran akan digunakan untuk memperbaiki penelitian dan skripsi ini untuk perbaikan dan pengembangan selanjutnya.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Latar Belakang Gardu Induk Sengkaling

Gardu Induk Sengkaling merupakan salah satu gardu induk yang dikelola dibawah wewenang PT. PLN APP Malang dimana PT. PLN APP Malang bekerja dibawah wewenang PT. PLN P3B untuk Region Jawa Timur dan Bali (di bawah PT. PLN P3B pusat). Gardu induk ini beroperasi pada tegangan sisi terima 150 KV. Tegangan 150 KV tersebut dipasok dari Gardu Induk Kebonagung. Gardu Induk Sengkaling mempunyai kapasitas transformator terpasang 180 MVA, yang terdiri dari :

- Transformator IBT 1 merk POUWELS 150/70 Kv 60 MVA, Transformator 2 merk XIAN 150/70 kV 30 MVA untuk mensuplai gardu induk blimbing dan gardu induk selorejo paralel PLTA selorejo, PLTA mendalan, PLTA siman sampai gardu induk sekarputih, apabila konfigurasi itu dikehendaki. Saat ini konfigurasi di PLTA Mendalan lepas PMT untuk yang arah Sengkaling.
- Transformator 3 merk UNINDO 150/20 Kv 30 MVA untuk menyuplai 4 penyulang dan data transformator 3 ditunjukkan pada tabel 4.1 yaitu :
 1. Penyulang Junrejo
 2. Penyulang Pujon
 3. Penyulang Karangploso
 4. Penyulang Wastraindah

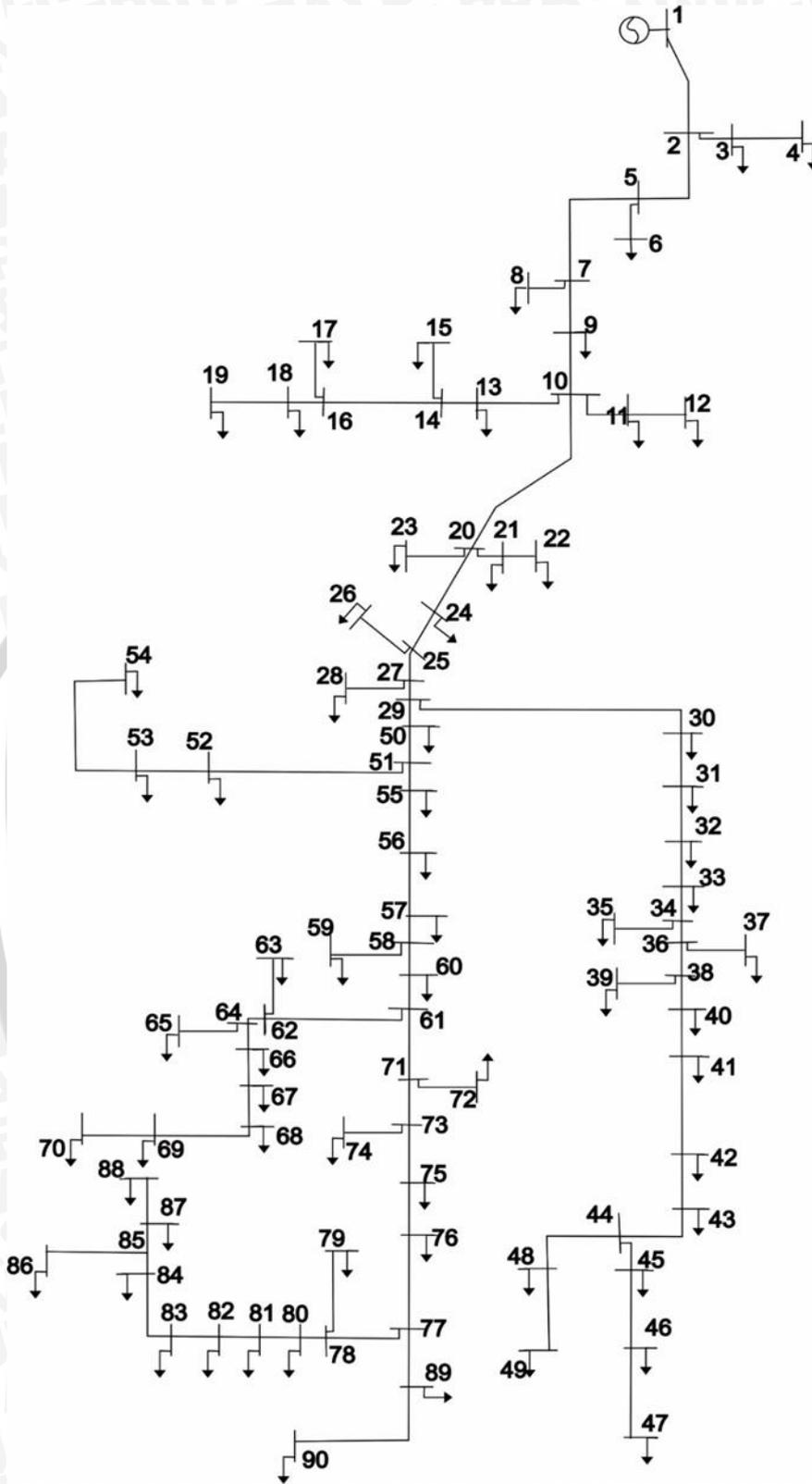
Tabel 4. 1 Data Transformator Daya III Gardu Induk Sengkaling Malang

Merk	UNINDO
Tipe	TTUB 150/30000
Daya	30 MVA
Impedansi	12,5%
Tegangan	150/20 Kv
Tahanan Pentanahan	500 ohm
Hub. Belitan	Ynyn0 (dl)

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang, 2010

- Tranformator 4 merk SHANDONG 150/20 Kv 60 MVA untuk mensuplai 4 penyulang, yaitu :
 1. Penyulang Batu
 2. Penyulang Dinoyo
 3. Penyulang Selecta
 4. Penyulang Tegal Gondo
 5. Graha Dewata
 6. Unicora

Penyulang – penyulang tersebut unuk selanjutnya menjadi wewenang PT. PLN (Persero) Distribusi.



Gambar 4. 1 Single line diagram penyulang pujan

Sumber : PT.PLN (PERSERO)AP&J MALANG



4.2 Sistem Distribusi Daya

Sistem distribusi pada penyulang Pujon adalah sistem distribusi tipe radial tegangan 20 kV dengan panjang saluran 59,64 km. Keuntungan saluran distribusi tipe radial adalah tipe ini tidak rumit dan lebih murah dibanding dengan sistem yang lain. Namun, keandalan sistem ini lebih rendah dibanding dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada diujung saluran. Besarnya jatuh tegangan di ujung saluran itulah sehingga perlu dilakukan penyambungan DG untuk memperbaiki level tegangan di ujung saluran. Terdapat beberapa data yang diperlukan pada penelitian ini untuk mensimulasikan saluran distribusi diantaranya data generator, data saluran, dan data pembebanan transformator.

4.2.1 Data Gardu Induk

Pada GI Sengkaling MVA hubung singkat diperoleh dari jaringan distribusi yang dipasang dari tegangan tinggi dengan menggunakan transformator daya 3. Pada tabel 4.1 diketahui besar tegangan dasar, yaitu 20 kV sedangkan untuk MVA hubung singkat terlebih dahulu harus diketahui nilai arus hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi yang mewakili semua unit pembangkit beroperasi, menurut data sekunder yang ditunjukkan pada tabel di lampiran 8, nilai arus hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi 150 kV yang menjadi suplai Gardu Induk Sengkaling Malang sebesar 9,73581 kA. Dengan menggunakan persamaan didapat nilai MVA hubung singkat sebagai berikut:

$$\begin{aligned} MVA_{hs} &= \sqrt{3} \times 150 \text{ kV} \times 9,73581 \text{ kA} \\ &= 2529,44 \text{ MVA} \end{aligned}$$

4.2.2 Data Saluran

Saluran distribusi penyulang Pujon memiliki total panjang 59,654 kilometer. Data kode saluran dan panjang saluran didapatkan dari *software* ArcGis berdasarkan koordinat yang telah diberikan oleh instansi terkait yaitu PT.PLN (persero). Data Panjang Saluran penyulang Pujon ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Data Panjang Saluran penyulang Pujon

Dari	Ke	Kode Saluran	Jarak Saluran (km)
G1	BUS-1	M104	7,112
BUS-1	BUS-2	M104	0,026
BUS-1	BUS-4	M103	0,513
BUS-2	BUS-3	M104	0,03
BUS-4	BUS-5	M104	0,43
BUS-4	BUS-6	M103	0,604
BUS-6	BUS-7	M104	0,304
BUS-6	BUS-8	M103	0,513
BUS-8	BUS-9	M103	0,733
BUS-9	BUS-10	M107	0,11
BUS-9	BUS-12	M104	0,183
BUS-9	BUS-17	M103	0,507
BUS-10	BUS-11	M106	0,097
BUS-10	BUS-14	M107	0,616
BUS-12	BUS-13	M104	0,234
BUS-14	BUS-15	M107	0,553
BUS-15	BUS-16	M107	0,774
BUS-17	BUS-18	M103	0,138
BUS-18	BUS-19	M103	0,067
BUS-18	BUS-20	M104	0,936
BUS-19	BUS-21	M104	0,305
BUS-19	BUS-27	M104	0,708
BUS-20	BUS-30	M104	0,581
BUS-20	BUS-32	M104	0,048
BUS-21	BUS-22	M104	0,038
BUS-22	BUS-23	M104	0,133
BUS-22	BUS-24	M104	0,623
BUS-24	BUS-25	M104	0,233
BUS-25	BUS-26	M104	0,252
BUS-27	BUS-29	M104	0,295
BUS-30	BUS-31	M104	0,101
BUS-32	BUS-33	M107	0,308
BUS-32	BUS-35	M104	0,951
BUS-33	BUS-34	M107	0,066
BUS-35	BUS-36	M107	0,145
BUS-35	BUS-37	M104	0,047
BUS-37	BUS-38	M104	0,044
BUS-37	BUS-39	M104	0,434
BUS-39	BUS-40	M104	0,395

BUS-39	BUS-42	M104	0,1
BUS-40	BUS-41	M104	0,039
BUS-42	BUS-43	M104	0,767
BUS-42	BUS-66	M104	0,198
BUS-43	BUS-44	M104	0,341
BUS-44	BUS-45	M104	0,947
BUS-45	BUS-46	M104	0,571
BUS-46	BUS-47	M104	0,03
BUS-47	BUS-48	M104	0,448
BUS-47	BUS-49	M104	0,4
BUS-49	BUS-50	M104	0,806
BUS-49	BUS-51	M104	0,076
BUS-51	BUS-52	M104	0,128
BUS-51	BUS-54	M104	0,498
BUS-54	BUS-55	M104	0,468
BUS-52	BUS-53	M104	0,047
BUS-55	BUS-56	M104	1,689
BUS-56	BUS-57	M104	1,085
BUS-57	BUS-58	M104	1,163
BUS-58	BUS-59	M102	0,527
BUS-58	BUS-62	M104	0,909
BUS-59	BUS-60	M102	0,294
BUS-60	BUS-61	M102	0,145
BUS-62	BUS-63	M104	1,405
BUS-63	BUS-64	M104	1,205
BUS-64	BUS-65	M104	0,769
BUS-66	BUS-67	M104	0,7
BUS-66	BUS-73	M104	0,238
BUS-67	BUS-68	M104	0,912
BUS-68	BUS-69	M104	0,684
BUS-69	BUS-72	M104	2,203
BUS-70	BUS-71	M104	0,052
BUS-73	BUS-74	M104	0,949
BUS-74	BUS-75	M104	0,618
BUS-75	BUS-76	M104	0,059
BUS-76	BUS-77	M107	0,286
BUS-76	BUS-79	M104	0,204
BUS-77	BUS-78	M107	0,024
BUS-79	BUS-80	M104	0,247
BUS-80	BUS-81	M107	1,56
BUS-80	BUS-93	M104	0,057
BUS-81	BUS-82	M107	0,39

Sumber : Penulis

4.2.3 Data Pembebanan Transformator

Saluran distribusi penyulang Pujon memiliki 67 transformator dengan berbagai jenis beban, diantaranya adalah beban industri, beban perumahan, dan juga beban komersil.

Data pembebanan transformator pada penyulang Pujon ditunjukkan dalam Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Data Pembebanan Transformator

No	No Gardu	Gardu Induk	Daya Trafo (kVA)	Pembebanan Trafo		
				PNYLNG	kVA	
					max	min
1	D0031	SKLNG	75	23,2	10,8	
		PUJON				
2	D0126	SKLNG	150	116,2	21,7	
		PUJON				
3	D0189	SKLNG	160	76,6	23,1	
		PUJON				
4	D0180	SKLNG	100	32,7	14,4	
		PUJON				
5	D0032	SKLNG	200	92	28,9	
		PUJON				
6	D0009	SKLNG	250	196,036	36,1	
		PUJON				
7	D0046	SKLNG	200	132,9	28,9	
		PUJON				
8	D0119	SKLNG	150	150	73,1	
		PUJON				
9	D0078	SKLNG	160	109,5	23,1	
		PUJON				
10	D0025	SKLNG	75	27,6	10,8	
		PUJON				
11	D0129	SKLNG	160	84,8	23,1	
		PUJON				
12	D0099	SKLNG	100	66,776	14,4	
		PUJON				
13	D0200	SKLNG	50	24,7	7,2	
		PUJON				
14	D0201	SKLNG	100	14,4	1,8	
		PUJON				
15	D0202	SKLNG	100	55,9	14,4	
		PUJON				

16	D0030	SKLNG	160	59,123	23,1
		PUJON			
17	D0174	SKLNG	160	101,5	23,1
		PUJON			
18	D0175	SKLNG	100	14,5	14,4
		PUJON			
19	D0016	SKLNG	200	108,3	28,9
		PUJON			
20	D0168	SKLNG	25	4,3	3,6
		PUJON			
21	D0206	SKLNG	200	70,8	28,9
		PUJON			
22	D0212	SKLNG	50	35,3	7,2
		PUJON			
23	D0057	SKLNG	150	100,8	21,7
		PUJON			
24	D0153	SKLNG	160	78,7	23,1
		PUJON			
25	D0059	SKLNG	160	76	23,1
		PUJON			
26	D0087	SKLNG	100	23,2	14,4
		PUJON			
27	D0266	SKLNG	200	54,8	28,9
		PUJON			
28	D0088	SKLNG	100	5,025	20,1
		PUJON			
29	D0124	SKLNG	50	27,5	7,2
		PUJON			
30	D0089	SKLNG	160	98,2	23,1
		PUJON			
31	D0101	SKLNG	100	46,5	14,4
		PUJON			
32	D0102	SKLNG	160	96,9	23,1
		PUJON			
33	D0103	SKLNG	100	40,1	14,4
		PUJON			
34	D0167	SKLNG	50	15,5	7,2
		PUJON			
35	D0104	SKLNG	100	56,6	14,4
		PUJON			

36	D0166	SKLNG	50-	25,8	7,2
		PUJON			
37	D0213	SKLNG	100	45,3	14,4
		PUJON			
38	D0058	SKLNG	100	60,1	14,4
		PUJON			
39	D0060	SKLNG	160	116,043	23,25
		PUJON			
40	D0217	SKLNG	50	28,575	7,2
		PUJON			
41	D0036	SKLNG	75	44,7	10,8
		PUJON			
42	D0145	SKLNG	160	96,8	23,3
		PUJON			
43	D0019	SKLNG	160	113,4	23,15
		PUJON			
44	D0198	SKLNG	160	116,556	23,1
		PUJON			
45	D0123	SKLNG	150	124,1	21,7
		PUJON			
46	D0098	SKLNG	160	92,925	23,1
		PUJON			
47	D0236	SKLNG	160	81,2	23,1
		PUJON			
48	D0079	SKLNG	200	148,6	28,9
		PUJON			
49	D0094	SKLNG	150	71,8	23,694
		PUJON			
50	D0216	SKLNG	50	30,7	7,2
		PUJON			
51	D0094	SKLNG	100	59,5	14,4
		PUJON			
52	D0216	SKLNG	160	79,8	23,1
		PUJON			
53	D0195	SKLNG	160	47,458	23,15
		PUJON			
54	D0061	SKLNG	160	105,2	23,1
		PUJON			
55	D0064	SKLNG	100	52,3	14,4
		PUJON			

56	D0147	SKLNG	50	38,8	7,2
		PUJON			
57	D0196	SKLNG	50	20,5	7,2
		PUJON			
58	D0063	SKLNG	100	52,9	14,4
		PUJON			
59	D0065	SKLNG	160	108,9	23,1
		PUJON			
60	D0066	SKLNG	100	58,9	14,4
		PUJON			
61	D0219	SKLNG	100	52,2	14,4
		PUJON			
62	D0076	SKLNG	75	41,33	10,8
		PUJON			
63	D0077	SKLNG	160	103,8	23,1
		PUJON			
64	D0197	SKLNG	25	17,7	3,6
		PUJON			
65	D0262	SKLNG	100	38,027	12,55
		PUJON			
66	D0033	SKLNG	250	153,219	50,562
		PUJON			
67	D0265	SKLNG	100	73,928	24,39
		PUJON			

Sumber : PT. PLN(Persero)

4.3 Distributed Generation

Distributed generation yang digunakan dalam penelitian ini adalah *wind turbine* dan mikrohidro.

4.3.1 Wind Turbine

Data penelitian *wind turbine* diambil dalam waktu 90 hari dengan nilai kecepatan angin tiap harinya ditunjukkan pada lampiran 3 sedangkan untuk nilai kecepatan angin rata-rata tiap harinya (m/s) ditunjukkan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Kecepatan angin rata – rata setiap hari

Hari	Rata-rata	Hari	Rata-rata	Hari	Rata-rata
1	6,95	31	3,52	61	2,14
2	6,44	32	5,93	62	2,24
3	5,60	33	4,22	63	2,35
4	5,66	34	4,70	64	2,93
5	5,04	35	4,01	65	2,94
6	5,26	36	3,64	66	3,41
7	5,19	37	3,97	67	3,70
8	5,08	38	3,65	68	3,51
9	5,26	39	3,78	69	3,70
10	6,68	40	2,81	70	2,72
11	5,72	41	2,84	71	3,09
12	4,61	42	3,40	72	3,38
13	5,22	43	1,89	73	3,23
14	6,23	44	1,45	74	2,65
15	6,11	45	3,31	75	3,49
16	6,24	46	1,98	76	4,58
17	4,17	47	2,13	77	4,57
18	5,34	48	3,28	78	4,83
19	5,19	49	3,51	79	5,18
20	6,52	50	1,70	80	6,30
21	4,79	51	1,70	81	5,68
22	4,41	52	3,63	82	3,34
23	4,91	53	3,70	83	4,73
24	3,75	54	2,03	84	6,20
25	6,25	55	2,31	85	6,11
26	5,55	56	2,00	86	6,24
27	4,82	57	2,03	87	4,66
28	5,12	58	1,80	88	5,16
29	5,59	59	2,03	89	5,27
30	5,55	60	3,45	90	4,23

Sumber : Pengukuran

Generator yang digunakan adalah generator asinkron merek suzlon

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3_{\text{wind}}$$

Nilai koefisien daya rotor sesuai dengan tinjauan pustaka maka nilai C_p adalah 0,4 dengan nilai kecepatan angin rata – rata adalah 4,3 serta luas baling – baling dan kerapatan udara masing - masing adalah 2.124 dan 1,2.

Sehingga daya yang dibangkitkan adalah:

$$\begin{aligned} P_{\text{wind}} &= 0,5 \times 0,4 \times 1,2 \times 2.124 \times (4,3)^3 \\ &= 40.529,489 \text{ watt} \end{aligned}$$

Daya angin adalah daya masukan generator, dengan efisiensi yang telah diklaim oleh merek dagang suzlon adalah 0,95 maka daya keluaran generator dapat diketahui dengan persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$P_{out} = 40.529,489 \times 0,95$$

$$= 38.503,01 \text{ watt}$$

$$= 38,50301 \text{ kW}$$

Jadi, daya keluaran generator adalah 38,5031 kW, dengan *power factor* 0,9 - 0,95 maka nilai untuk S dan Q untuk *power factor* 0,95 adalah sebagai berikut :

$$S = 40.529,489 \text{ VA}$$

$$Q = 12.655,33 \text{ Var}$$

4.3.2 Mikrohidro

Lokasi penelitian mikrohidro berada di Desa Bendosari Kecamatan Pujon yang telah dibangun oleh Universitas Brawijaya. Penelitian ini menggunakan generator sinkron dengan spesifikasi ditunjukkan dalam Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Spesifikasi generator

Synchronous Generator	three-phase
	380/220V
	50 Hz
	1500 rpm
	15kVA
	p.f. 0.85 – 0.90

sumber : Nameplate

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai daya elektrik generator adalah 8,7 kW, dengan *power factor* sebesar 0,9 maka nilai daya reaktif dapat diketahui dengan persamaan:

$$S = \frac{P}{\cos \theta}$$

$$= \frac{8700}{0,9}$$

$$S = 9.666,67 \text{ VA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$= \sqrt{(9666,67)^2 - (8700)^2}$$

$$= 4.213,61 \text{ var}$$

4.3.3 Simulasi Hubung Singkat

Simulasi hubung singkat dilakukan untuk mengetahui kondisi sistem sebelum dan sesudah terhubung dengan *distributed generation* dengan menganalisis nilai arus hubung singkat yang meliputi arus hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa pada penyulang Pujon. Simulasi akan dilakukan dalam empat keadaan, yaitu kondisi 1 adalah keadaan sebelum penambahan *distributed generation*, kondisi 2 adalah keadaan setelah penambahan *wind turbine* mikrohidro, kondisi 3 adalah keadaan setelah penambahan mikrohidro, kondisi 4 adalah keadaan setelah penambahan *wind turbine* dan mikrohidro.

Empat kondisi sistem inilah yang akan dianalisis pada penelitian ini, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Pengondisian sistem

Nama	Kondisi
Kondisi 1	PLN
Kondisi 2	PLN + <i>wind turbine</i>
Kondisi 3	PLN + mikrohidro
Kondisi 4	PLN + <i>wind turbine</i> + mikrohidro

4.4 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

4.4.1 Menghitung Impedansi Sumber

Untuk mendapatkan besar arus hubung singkat pada jaringan, tahap yang pertama yaitu menghitung impedansi sumber. Dimana, dapat dihitung dengan memasukkan data dari data Transformator Tenaga III Gardu Induk Sengkaling, yaitu tegangan sisi primer trafo tenaga 150 kV dan data hubung singkat di bus primer (150 kV) di Gardu Induk Sengkaling adalah sebesar 2529,44 MVA kedalam persamaan berikut.

Maka impedansi dasar (X_s) adalah:

$$X_s = \frac{\text{kV}^2}{\text{MVA}} = \frac{150^2}{2529,44} = 8,8968 \Omega$$

Untuk mengetahui nilai impedansi di sisi sekunder (yaitu di bus 20 kV) harus dikonversi dulu ke sisi sekunder, menggunakan persamaan (2.11) seperti yang ditunjukkan pada gambar (2.7).

Maka impedansi disisi 20 kV adalah:

$$X_s (\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{20^2}{150^2} \times X_s (\text{sisi } 150 \text{ kV})$$

$$= \frac{20^2}{150^2} \times 8,8968$$

$$= 0,1582 \Omega$$

4.4.2 Menghitung Reaktansi Transformator

Besarnya reaktansi transformator tenaga III di gardu Induk Sengkaling adalah 12,5%, agar dapat mengetahui besarnya reaktansi urutan positif, reaktansi urutan negatif dan reaktansi urutan nol dalam ohm, maka perlu dihitung dulu besar ohm pada 100 % nya. Yaitu kedalam persamaan rumus (2.12).

Besar nilai ohm pada 100 % yaitu:

$$Z_B = \frac{kV^2}{MVA} = \frac{20^2}{30} = 13,3333\Omega$$

Nilai reaktansi trafo tenaga dengan menggunakan, yaitu:

1. Reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{t1} = X_{t2}$) dengan menggunakan persamaan 2.13.

X_{t1} = reaktansi trafo (%) x Z_B

$$X_{t1} = 12,5 \% \times 13,3333 = 1,6667 \Omega$$

$$X_{t1} = X_{t2} = 1,6667 \Omega$$

Hasil perhitungan impedansi sumber, reaktansi urutan positif dan reaktansi urutan negatif ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut:

Tabel 4. 7 Hasil perhitungan impedansi sumber, reaktansi urutan positif dan reaktansi urutan negatif sistem 20 kV penyulang Junrejo

No.	Impedansi Sumber (X_S sisi 20 kV)	Reaktansi urutan positif (X_{T1})	Reaktansi urutan negatif (X_{T2})
1	0,1582 ohm	1,6667 ohm	1,6667 ohm

4.4.3 Menghitung Impedansi Penyulang

Penyulang Pujon 20 kV memiliki total panjang saluran 59,654 km dan saluran terpanjang yaitu 32,323km yang menggunakan jenis penghantar A3C 70 mm² dari GI hingga ke ujung penyulang.

Besar nilai impedansi urutan positif (Z_1) dan urutan negatif (Z_2) penyulang mulai dari GI hingga ujung penyulang menggunakan ditunjukkan pada tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Impedansi penyulang mulai dari GI hingga ujung penyulang

	Data ohm/km		32,323 km	
	R	jX	R (ohm)	jX (ohm)
Z ₁ =Z ₂	0,4608	0,3572	14,8944	11,54577

Sumber : Hasil perhitungan

4.4.4 Menghitung Impedansi Ekuivalen Urutan Positif dan Urutan negatif

Dengan memanfaatkan hasil impedansi penyulang pada Tabel 4.7, dan 4.8 kedalam persamaan didapat hasil impedansi ekuivalen (Z_{1eki} dan Z_{2eki}) pada beberapa lokasi gangguan hubung singkat di penyulang Gardu Induk Sengkaling.

1. Perhitungan Z_{1 eki} dan Z_{2 eki} sepanjang Gardu Induk hingga ujung penyulang.

Perhitungan besarnya nilai impedansi ekuivalen urutan positif (Z_{1eki}), urutan negatif (Z_{2eki}) menggunakan persamaan (2.15):

$$Z_{1eki} = Z_{2eki} = (n\% \times R_{1jar}) + j (X_S + X_{T1} + (n\% \times X_{1jar}))$$

$$\begin{aligned} Z_{1eki} \text{ 1\%} &= (1\% \times 14,8944) + j (0,1582 + 1,6667 + (1\% \times 11,54577)) \\ &= 0,14894 + j 1,95606 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama untuk perhitungan impedansi ekuivalen (Z_{1eki} dan Z_{2eki}) dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut ini:

Tabel 4. 9 Hasil perhitungan impedansi ekuivalen (Z_{1eki} dan Z_{2eki}) menurut lokasi terjadinya gangguan mulai dari GI hingga ujung penyulang dengan panjang 59,654 km.

No.	Lokasi (% Panjang)	Impedansi Ekuivalen	
		Z _{1eki}	Z _{2eki}
1	1%	0,148944 + j1,9406577	0,148944 + j1,9406577
2	10%	1,48944 + j2,979777	1,48944 + j2,979777
3	20%	2,97888 + j4,134354	2,97888 + j4,134354
4	30%	4,46832 + j5,288931	4,46832 + j5,288931
5	40%	5,95776 + j6,443508	5,95776 + j6,443508
6	50%	7,4472 + j7,598085	7,4472 + j7,598085
7	60%	8,93664 + j8,752662	8,93664 + j8,752662
8	70%	10,42608 + j9,907239	10,42608 + j9,907239
9	80%	11,91552 + j11,061816	11,91552 + j11,061816
10	90%	13,40496 + j12,216393	13,40496 + j12,216393
11	100%	14,8944 + j13,37097	14,8944 + j13,37097

Sumber : Hasil perhitungan

4.4.5 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Simulasi Kondisi 1

Pada simulasi ini adalah keadaan sebelum penambahan *Distributed Generation*. Saluran distribusi penyulang Pujon memiliki total panjang 59,654 kilometer. Dimana lokasi gangguan diletakkan pada 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% 70%, 80%, 90%, 100% dan di recloser dari panjangnya saluran penyulang pujon. Titik-titik tersebut terletak pada Bus 1, bus 5, bus12, bus 25, bus 35, bus 44, bus 52, bus 62, bus 69, bus 84, bus 90 dan pada recloser. Dimana titik-titik tersebut mewakili dari panjangnya saluran penyulang pujon.

4.4.5.1 Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dengan menggunakan Tabel 4.9, kedalam persamaan sehingga didapat hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa.

Sehingga arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung sebagai berikut:

1. Perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa sepanjang Gardu Induk hingga ujung penyulang.

$$\begin{aligned}
 I_{3\text{fasa}} &= \frac{V}{Z_{1\text{eki}}} \\
 &= \frac{\frac{20.000}{\sqrt{3}}}{Z_{1\text{eki}}} \\
 &= \frac{\frac{20.000}{\sqrt{3}}}{0,148944 + j1,9406577} \\
 &= \frac{\frac{20.000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{0,148944^2 + 1,9406577^2}} \\
 &= 5932,6 \text{ A}
 \end{aligned}$$

4.4.5.2 Arus Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dua fasa dengan menggunakan Tabel 4.9, kedalam persamaan sehingga didapat hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat dua fasa.

Sehingga arus gangguan hubung singkat 2 fasa dapat dihitung sebagai berikut:

1. Perhitungan arus gangguan hubung singkat 2 fasa sepanjang Gardu Induk hingga ujung penyulang.

$$\begin{aligned}
 I_{2\text{fasa}} &= \frac{V}{Z_{1\text{eki}} + Z_{2\text{eki}}} \\
 &= \frac{\frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times Z_{1\text{eki}}} \\
 &= \frac{\frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times (0,148944 + j 2,038284)}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{20.000}{\sqrt{3}} \sqrt{(2 \times 0,148944)^2 + (2 \times 1,9406577)^2}$$

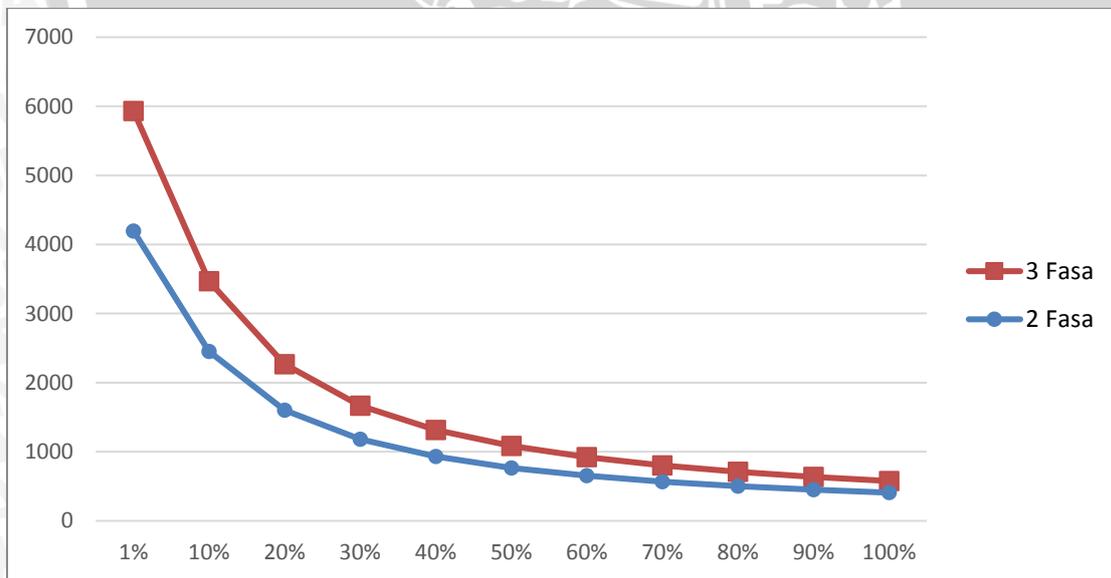
$$= 4194,982 \text{ A}$$

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan dua fasa pada titik lokasi gangguan penyulang 20 kV Transformator Daya III Gardu Induk Sengkaling yang lain seperti ditunjukkan pada tabel 4.10 berikut ini:

Tabel 4. 10 Hasil arus gangguan hubung singkat:

Panjang Penyulang	Lokasi Gangguan	Arus Hubung Singkat (A)	
		3 Fasa	2 Fasa
1%	Bus 1	5932,6	4194,98
10%	Bus 5	3466,22	2450,99
20%	Bus 12	2266	1602,31
30%	Bus 25	1667,73	1179,26
40%	Bus 35	1315,786	930,4
50%	Bus 44	1085,33	767,444
60%	Bus 52	923,1	652,73
70%	Bus 62	802,85	567,7
80%	Bus 69	710,2	502,192
90%	Bus 84	636,67	450,19
100%	Bus 90	576,899	407,929

Sumber: Penulis



Gambar 4. 2 Grafik arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 1

Sumber: Penulis

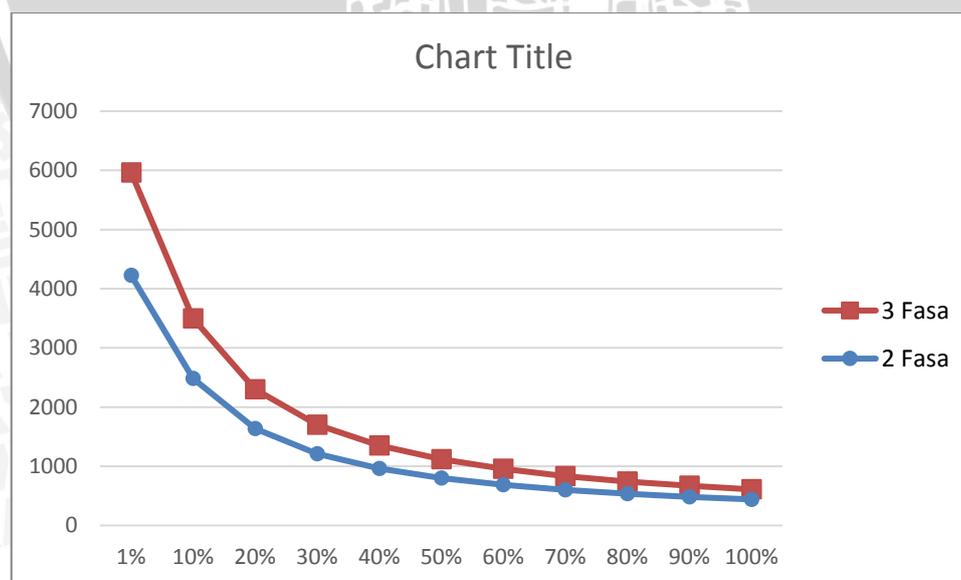
4.4.6 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Simulasi Kondisi 2

Pada simulasi kondisi 2 adalah keadaan setelah dipasang satu buah *Distributed Generation* yaitu sebuah *Wind Turbine*. Saluran distribusi penyulang Pujon memiliki total panjang 59,654 kilometer. Dimana lokasi gangguan diletakkan pada 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% 70%, 80%, 90%, 100% dan di recloser dari panjangnya saluran penyulang pujon. Titik-titik tersebut terletak pada Bus 1, bus 5, bus12, bus 25, bus 35, bus 44, bus 52, bus 62, bus 69, bus 84, bus 90 dan pada recloser. Dimana titik-titik tersebut mewakili dari panjangnya saluran penyulang pujon. Hasil arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 2 ditunjukkan oleh tabel 4.11 berikut ini.

Tabel 4. 11 Hasil arus gangguan hubung singkat:

Panjang Penyulang	Lokasi Gangguan	Arus Hubung Singkat (A)	
		3 Fasa	2 Fasa
1%	Bus 1	5965,6	4227,98
10%	Bus 5	3499,22	2483,99
20%	Bus 12	2299	1635,31
30%	Bus 25	1700,73	1212,26
40%	Bus 35	1348,786	963,4
50%	Bus 44	1118,33	800,444
60%	Bus 52	956,1	685,73
70%	Bus 62	835,85	600,7
80%	Bus 69	743,2	535,192
90%	Bus 84	669,67	483,19
100%	Bus 90	609,899	440,929

Sumber: Penulis



Gambar 4. 3 Grafik arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 2

Sumber: Penulis

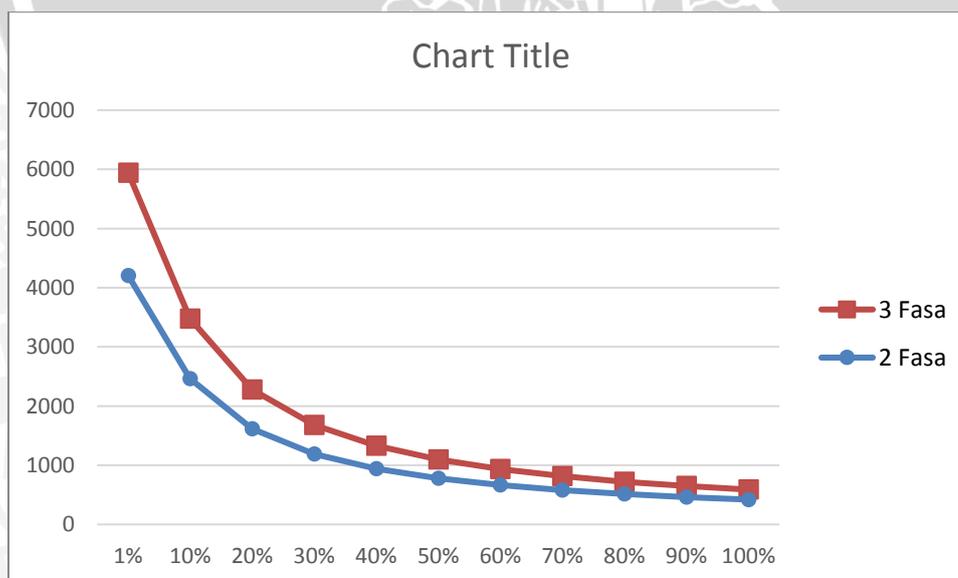
4.4.7 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Simulasi Kondisi 3

Pada simulasi kondisi 3 adalah keadaan setelah dipasang satu buah *Distributed Generation* yaitu sebuah *Micro Hydro*. Saluran distribusi penyulang Pujon memiliki total panjang 59,654 kilometer. Dimana lokasi gangguan diletakkan pada 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% 70%, 80%, 90%, 100% dan di recloser dari panjangnya saluran penyulang pujon. Titik-titik tersebut terletak pada Bus 1, bus 5, bus 12, bus 25, bus 35, bus 44, bus 52, bus 62, bus 69, bus 84, bus 90 dan pada recloser. Dimana titik-titik tersebut mewakili dari panjangnya saluran penyulang pujon Hasil arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 3 ditunjukkan oleh tabel 4.12 berikut ini..

Tabel 4. 12 Hasil arus gangguan hubung singkat:

Panjang Penyulang	Lokasi Gangguan	Arus Hubung Singkat (A)	
		3 Fasa	2 Fasa
1%	Bus 1	5944,268	4206, 879
10%	Bus 5	3478, 941	2462, 161
20%	Bus 12	2278, 617	1614, 766
30%	Bus 25	1679, 362	1191, 863
40%	Bus 35	1327, 345	942, 472
50%	Bus 44	1097, 752	779, 347
60%	Bus 52	935, 415	664, 204
70%	Bus 62	814, 291	579, 241
80%	Bus 69	722, 142	514, 079
90%	Bus 84	648, 419	462, 354
100%	Bus 90	588, 293	419, 157

Sumber: Penulis



Gambar 4. 4 Grafik arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 3

Sumber: Penulis

4.4.8 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Simulasi Kondisi 4

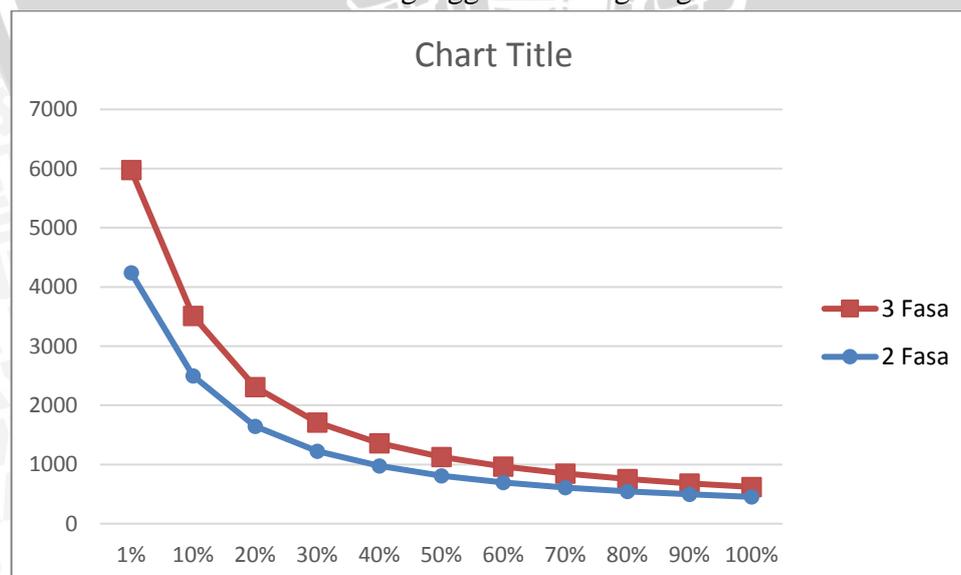
Pada simulasi kondisi 4 adalah keadaan setelah dipasang dua buah *Distributed Generation* yaitu *Wind Turbine* dan *Micro Hydro*. Saluran distribusi penyulang Pujon memiliki total panjang 59,654 kilometer. Dimana lokasi gangguan diletakkan pada 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% 70%, 80%, 90%, 100% dan di recloser dari panjangnya saluran penyulang pujon. Titik-titik tersebut terletak pada Bus 1, bus 5, bus 12, bus 25, bus 35, bus 44, bus 52, bus 62, bus 69, bus 84, bus 90 dan pada recloser. Dimana titik-titik tersebut mewakili dari panjangnya saluran penyulang pujon. Hasil arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 4 ditunjukkan oleh tabel 4.13 berikut ini.

Tabel 4. 13 Hasil arus gangguan hubung singkat:

Panjang Penyulang	Lokasi Gangguan	Arus Hubung Singkat (A)	
		3 Fasa	2 Fasa
1%	Bus 1	5977,68	4239, 189
10%	Bus 5	3511,221	2495, 161
20%	Bus 12	2311, 617	1647, 76
30%	Bus 25	1712, 362	1224,263
40%	Bus 35	1360, 345	975, 44
50%	Bus 44	1130, 752	812, 7
60%	Bus 52	968, 415	697, 242
70%	Bus 62	847, 91	612, 124
80%	Bus 69	755,242	547, 407
90%	Bus 84	681, 419	495, 835
100%	Bus 90	621,823	452, 215

Sumber: Penulis

Grafik arus gangguan hubung singkat:



Gambar 4. 5 Grafik arus gangguan hubung singkat simulasi kondisi 4

Sumber: Penulis

4.5 Koordinasi Rele Arus Lebih Pada Penyulang Pujon

Tabel 4. 14 Data rele arus lebih masukan GI Sengkaling

Merk	GEC
Tipe	MCGG 82
Nomer Serie	793468 D
Setelan Arus (I _{>})	1000 A
Time Dial _{>}	0,2 (SI)
Rasio CT	2000/5
Karakteristik	Standart Inverse
Arus Nominal (I _n)	5 A

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang, 2010

Tabel 4. 15 Data rele arus lebih penyulang Pujon

Merk	MICOM
Tipe	P127
Nomer Serie	36007937
Setelan Arus (I _{>})	320
Time Dial >	0,05 (SI)
Setelan Arus Instan (I _{>>})	2000 A
Time Dial >>	Instan
Rasio CT	400/5
Karakteristik	Standart Inverse
Arus Nominal (I _n)	5 A

Sumber: PT. PLN (Persero) APJ Malang, 2014

Tabel 4. 16 Data Penutup Balik Otomatis atau Recloser

Tipe	Entec – EVRC2A
Setelan Arus (I _{>})	250 A
Time Dial _{>}	0,05 detik
Ratio CT	1000/1
Karakteristik	Standart Inverse

Sumber : PT. PLN (Persero) APJ Malang

4.5.1 Perhitungan setelan *Recloser* dan Rele Arus Lebih Pada Simulasi Kondisi 1

Pada simulasi kondisi 1 adalah kondisi dimana belum terhubung dengan *Distributed Generation*. Pada perhitungan setelan *Recloser* dan rele arus lebih baik di sisi penyulang maupun masukan 20 kV dimulai dari *Recloser* yang merupakan proteksi utaman selanjutnya ke rele arus lebih sisi penyulang atau *outgoing feeder* dan rele arus lebih sisi masukan atau *incoming feeder*. Perhitungan setelan sebagai berikut:

4.5.1.1 Penyetelan Arus dan TMS di *Recloser*

Perhitungan penyetelan rele arus lebih dilakukan dengan melakukan perhitungan terhadap penyetelan arus dan penyetelan TMS.

1. Nilai setelan arus di *Recloser*

Untuk setelan rele yang terpasang di penyulang dihitung berdasarkan arus beban maksimum. Untuk rele *inverse* biasanya diset sebesar 1,05 sampai dengan $1,1 \times I_{\max}$. *Recloser* yang digunakan adalah dengan karakteristik normal (*standart*) *inverse*.

Setelan rele arus lebih dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

Setelan Arus pada *Recloser*

- Arus Primer

$$I_s = 1,05 \times I_n$$

$$I_s = 1,05 \times 93,56 \text{ A}$$

$$= 98,24 \text{ A}$$

Nilai setelan ini merupakan nilai primer, untuk memperoleh nilai setelan sekunder yang akan diatur pada *recloser*, maka harus dihitung dengan menggunakan data rasio transformator arus yang terpasang di penyulang tersebut, yaitu:

- Arus Sekunder

$$I_p = I_s \times \frac{1}{\text{Rasio CT}}$$

$$I_p = 98,24 \times \frac{1}{1000/1}$$

$$= 0,0982 \text{ A}$$

2. Nilai setelan TMS (*Time Multiplier Setting*) di *Recloser*

Dengan menggunakan rumus berikut diperoleh nilai TMS di *Recloser* sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \times \left[\left(\frac{I_F}{I_S} \right)^\alpha - 1 \right]}{\beta}$$

Dimana :

$$t = 0,3 \text{ detik}$$

$$I_F = \text{arus gangguan} = 2266 \text{ A}$$

$$I_S = 98,24 \text{ A}$$

$$\alpha = 0,02$$

$$\beta = 0,14$$

$$TMS = \frac{0,3 \times \left[\left(\frac{2266}{98,24} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TMS = 0,13881 \text{ (tanpa satuan)}$$

Waktu kerja rele di *recloser* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan standar invers sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14 \times TMS}{\left[\left(\frac{I_{Fault}}{I_{Set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

Dimana:

$$TMS = 0,13881$$

$$I_{Fault} = \text{Arus gangguan di 1 \% di depan Recloser} \\ = 2266 \text{ A}$$

$$I_{SET} = 98,24 \text{ A}$$

$$t = \frac{0,14 \times 0,436}{\left[\left(\frac{2266}{98,24} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ = 0,3 \text{ detik.}$$

4.5.1.2 Penyetelan Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi Penyulang 20 kV

Untuk setelan rele yang terpasang di penyulang dihitung berdasarkan arus beban maksimum. Untuk rele *inverse* biasanya diset sebesar 1,05 sampai dengan 1,1 x I_{max} , sedangkan untuk rele *definite* diset sebesar 1,2 sampai dengan 1,3 x I_{max} . persyaratan lain yang harus dipenuhi yaitu untuk penyetelan waktu minimum dari rele arus lebih (terutama dipenyulang tidak lebih kecil dari 0,3 detik). Keputusan ini diambil agar rele tidak sampai trip lagi akibat adanya arus inrush dari trafo-trafo distribusi yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukkan.

Setelan Arus OCR Sisi Penyulang 20 kV

- Arus *Setting* Primer

$$I_s = 1,05 \times I_n$$

$$I_s = 1,05 \times 175 \text{ A} \\ = 183,75 \text{ A}$$

- Arus *Setting* Sekunder

$$I_p = I_s \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$I_p = 183,75 \times \frac{5}{400} \\ = 2,2875 \text{ A}$$

- a. Setelan TMS (*Time Multiplier Setting*)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya setting TMS rele arus lebih sisi penyulang 20 kV transformator tenaga yaitu arus gangguan hubung singkat 3 fasa di 20% panjang penyulang. Waktu kerja *recloser* yang ditetapkan

0,3 detik dan waktu tunda antara *recloser* dan rele di sisi penyulang (Δt) sebesar 0,4 detik. Keputusan ini diambil agar rele tidak sampai trip lagi akibat adanya arus inrush dari trafo-trafo distribusi yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukkan. Jadi didapat:

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left(\frac{2266}{183,75}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,35982$$

$$t = (t_{diREC} + \Delta t) = (0,3+0,4) \text{ detik} = 0,7 \text{ detik}$$

$$I_F = \text{ arus gangguan} = 2266 \text{ A}$$

$$I_S = 183,75 \text{ A}$$

$$\alpha = 0,02$$

$$\beta = 0,14$$

4.5.1.3 Penyetelan Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi *incoming* 20 kV

Penentuan setelan rele arus lebih pada sisi *incoming* 20 kv transformator tenaga sama halnya dengan di penyulang, yaitu harus diketahui terlebih dahulu nilai arus nominal transformator tenaga tersebut.

a. Setelan Arus OCR Sisi *incoming* 20 kV

- Arus *Setting* Primer

$$I_s = 1,05 \times I_n$$

$$\begin{aligned} I_s &= 1,05 \times 400 \text{ A} \\ &= 420 \text{ A} \end{aligned}$$

- Arus *Setting* Sekunder

$$I_p = I_s \times \frac{1}{n_{CT}}$$

$$\begin{aligned} I_p &= 400 \times \frac{5}{2000} \\ &= 1,05 \text{ A} \end{aligned}$$

b. Setelan TMS (*Time Multiplier Setting*)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya setting TMS rele arus lebih sisi *incoming* 20 kV transformator tenaga yaitu arus gangguan hubung singkat 3 fasa di 1% panjang penyulang.

$t_{incoming} = (t_{di\ outgoing} + \Delta t) = (0,7 + 0,4) \text{ detik} = 1,1 \text{ detik}$, jadi didapat:

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$1,1 = \frac{0,14}{\left(\frac{5932,6}{420}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,427324$$

4.5.1.3 Waktu Kerja Rele

Karena nilai arus gangguan hubung singkat yang didapat dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah dalam nilai arus primer, maka dalam pemeriksaan selektifitas nilai arus primernya juga diambil, untuk lokasi gangguan 20% panjang penyulang, waktu kerja rele arus lebih di penyulang dan *incoming* 20 kV adalah sebagai berikut:

Penyulang 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{2266}{183,750}\right)^{0,02} - 1} \times 0,25764$$

$$t = 0,97763 \text{ detik}$$

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{2266}{420}\right)^{0,02} - 1} \times 0,427324$$

$$t = 1,74494 \text{ detik}$$

4.5.2 Perhitungan setelan *Recloser* dan Rele Arus Lebih Pada Pada Simulasi

Kondisi 2

4.5.2.1 Penyetelan Arus dan TMS di *Recloser*

Dengan menggunakan persamaan , diperoleh nilai TMS di *Recloser* sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \times \left[\left(\frac{I_F}{I_s}\right)^\alpha - 1\right]}{\beta}$$

Dimana :

$$t = 0,3 \text{ detik}$$

$$I_F = \text{ arus gangguan} = 2299 \text{ A}$$

$$I_s = 98,24 \text{ A}$$

$$\alpha = 0,02$$

$$\beta = 0,14$$

$$TMS = \frac{0,3 \times \left[\left(\frac{2299}{98,24} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TMS = 0,13947$$

Waktu kerja rele di *recloser* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan standar invers sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14 \times TMS}{\left[\left(\frac{I_{Fault}}{I_{Set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

Dimana:

$$TMS = 0,13881$$

$$I_{Fault} = \text{Arus gangguan di 1 \% di depan Recloser} \\ = 2299 \text{ A}$$

$$I_{SET} = 98,24 \text{ A}$$

$$t = \frac{0,14 \times 0,436}{\left[\left(\frac{2299}{98,24} \right)^{0,02} - 1 \right]} \\ = 0,29984 \text{ detik.}$$

4.5.2.2 Penyetelan Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi Penyalang 20 kV

Setelan TMS (*Time Multiplier Setting*)

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left(\frac{2299}{183,75} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,36042$$

4.5.2.3 Penyetelan Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi *incoming* 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$1,1 = \frac{0,14}{\left(\frac{5965,6}{420} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,42824$$

4.5.2.4 Waktu Kerja Rele

Karena nilai arus gangguan hubung singkat yang didapat dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah dalam nilai arus primer, maka dalam pemeriksaan

selektifitas nilai arus primernya juga diambil, untuk lokasi gangguan 20% panjang penyulang, waktu kerja rele arus lebih di penyulang dan *incoming* 20 kV adalah sebagai berikut:

Penyulang 20 kV

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_S}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_S}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{2299}{183,750}\right)^{0,02} - 1} \times 0,25916$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{5965,6}{420}\right)^{0,02} - 1} \times 0,42824$$

$$t = 0,9735 \text{ detik}$$

$$t = 1,73356 \text{ detik}$$

4.5.3 Perhitungan setelan *Recloser* dan Rele Arus Lebih Pada Pada Simulasi Kondisi 3

4.5.3.1 Penyetelan Arus dan TMS di *Recloser*

Dengan menggunakan persamaan , diperoleh nilai TMS di *Recloser* sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \times \left[\left(\frac{I_F}{I_S}\right)^\alpha - 1\right]}{\beta}$$

Dimana :

$$t = 0,3 \text{ detik}$$

$$I_F = \text{ arus gangguan} = 2278, 617 \text{ A}$$

$$I_S = 98,24 \text{ A}$$

$$\alpha = 0,02$$

$$\beta = 0,14$$

$$TMS = \frac{0,3 \times \left[\left(\frac{2278,617}{98,24}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14}$$

$$TMS = 0,13905$$

Waktu kerja rele di *recloser* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan standar invers sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14 \times TMS}{\left[\left(\frac{I_{Fault}}{I_{Set}}\right)^{0,02} - 1\right]}$$

Dimana:

$$TMS = 0,13905$$

$$I_{Fault} = \text{ Arus gangguan di 1 \% di depan } \textit{Recloser}$$

$$= 2278,617 \text{ A}$$

$$I_{SET} = 98,24 \text{ A}$$

$$t = \frac{0,14 \times 0,13905}{\left[\left(\frac{2278,617}{98,24} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,29988 \text{ detik.}$$

4.5.3.2 Penyetelan Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi Penyulang 20 kV

Setelan TMS (*Time Multiplier Setting*)

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left(\frac{2278,617}{183,75} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,36$$

4.5.3.3 Penyetelan Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi *incoming* 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$1,1 = \frac{0,14}{\left(\frac{5944,268}{420} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,42766$$

4.5.3.4 Waktu Kerja Rele

Karena nilai arus gangguan hubung singkat yang didapat dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah dalam nilai arus primer, maka dalam pemeriksaan selektifitas nilai arus primernya juga diambil, untuk lokasi gangguan 20% panjang penyulang, waktu kerja rele arus lebih di penyulang dan *incoming* 20 kV adalah sebagai berikut:

Penyulang 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{2278,617}{183,750} \right)^{0,02} - 1} \times 0,36$$

$$t = 0,97612 \text{ detik}$$

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s} \right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{5944,268}{420} \right)^{0,02} - 1} \times 0,42766$$

$$t = 1,74076 \text{ detik}$$

4.5.4 Perhitungan setelan *Recloser* dan Rele Arus Lebih Pada Pada Simulasi

Kondisi 4

4.5.4.1 Penyetelan Arus dan TMS di *Recloser*

Dengan menggunakan persamaan , diperoleh nilai TMS di *Recloser* sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t x \left[\left(\frac{I_F}{I_S} \right)^\alpha - 1 \right]}{\beta}$$

Dimana :

$$t = 0,3 \text{ detik}$$

$$I_F = \text{ arus gangguan} = 2311, 617 \text{ A}$$

$$I_S = 98,24 \text{ A}$$

$$\alpha = 0,02$$

$$\beta = 0,14$$

$$TMS = \frac{0,3 x \left[\left(\frac{2311, 617}{98,24} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TMS = 0,13971$$

Waktu kerja rele di *recloser* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan standar invers sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14 x TMS}{\left[\left(\frac{I_{Fault}}{I_{Set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

Dimana:

$$TMS = 0,13971$$

$$I_{Fault} = \text{ Arus gangguan di } 1 \% \text{ di depan } \textit{Recloser}$$

$$= 2311, 617 \text{ A}$$

$$I_{SET} = 98,24 \text{ A}$$

$$t = \frac{0,14 x 0,13971}{\left[\left(\frac{2311, 617}{98,24} \right)^{0,02} - 1 \right]}$$

$$= 0,29979 \text{ detik.}$$

4.5.4.2 Penyetelan Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi Penyulang 20 kV

Setelan TMS (*Time Multiplier Setting*)

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$0,7 = \frac{0,14}{\left(\frac{2311,617}{183,75}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,36063$$

4.5.4.3 Penyetelan Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) Jenis *Inverse* di sisi *incoming* 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$1,1 = \frac{0,14}{\left(\frac{5977,68}{420}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,42857$$

4.5.4.4 Waktu Kerja Rele

Karena nilai arus gangguan hubung singkat yang didapat dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat adalah dalam nilai arus primer, maka dalam pemeriksaan selektifitas nilai arus primernya juga diambil, untuk lokasi gangguan 20% panjang penyulang, waktu kerja rele arus lebih di penyulang dan *incoming* 20 kV adalah sebagai berikut:

Penyulang 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{2311,617}{183,750}\right)^{0,02} - 1} \times 0,36063$$

$$t = 0,97203 \text{ detik}$$

incoming 20 kV

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{5977,68}{420}\right)^{0,02} - 1} \times 0,42857$$

$$t = 1,72953 \text{ detik}$$

Tabel 4. 17 Koordinasi rele arus lebih dan recloser pada 4 simulasi kondisi

	Waktu kerja rele (t)			
	Studi kasus 1	Studi kasus 2	Studi kasus 3	Studi kasus 4
Recloser	0,3	0,29984	0,29988	0,29979
outgoing	0,97763	0,9735	0,97612	0,97203
Incoming	1,74494	1,73356	1,74076	1,72953



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis dan simulasi arus hubung singkat, koordinasi antara *recloser*, rele arus lebih pada penyulang dan masukan (*incoming*) 20 kV Gardu Induk Sengkaling yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penyambungan *Distributed Generation* pada penyulang Pujon dapat menyebabkan kenaikan arus hubung singkat, yaitu arus hubung singkat tiga fasa penyulang Pujon sebelum tersambung *Distributed Generation* terbesar adalah 5932,6 A dan yang terkecil adalah 576,899 A. dan untuk arus gangguan hubung singkat dua fasa terbesar adalah 4194,98 A dan yang terkecil adalah 407,929 A. Sedangkan arus hubung singkat tiga fasa penyulang Pujon setelah tersambung *Distributed Generation* (*Micro Hydro* dan *Wind Turbine*) terbesar adalah 5977,68 A dan yang terkecil adalah 621,823 A. dan untuk arus gangguan hubung singkat dua fasa terbesar adalah 4239,189 A dan yang terkecil adalah 452, 215A.
2. Penyetelan *recloser* dan rele arus lebih pada sisi penyulang dan masukan 20 kV mengalami perubahan seting waktu koordinasi karena adanya kenaikan arus gangguan hubung singkat yang diakibatkan adanya penambahan *Distributed Generation* (*Micro Hydro* dan *Wind Turbine*). Semakin besar arus gangguan hubung singkat, maka waktu kerja rele semakin cepat. Hal ini dikarenakan rele akan cepat bereaksi terhadap arus gangguan yang besar untuk mengirim sinyal ke PMT untuk trip

5.2 Saran

Untuk mendapatkan pengamanan yang lebih baik untuk mengatasi terjadi arus gangguan hubung singkat maka sebaiknya analisis dilakukan pula terhadap seluruh pengamanan pada jaringan distribusi 20 kV, diantaranya *Fuse Cut Out* (FCO), *Sectionanalyzer* (SSO), *Load Break Switch* (LBS), dan pengamanan lainnya.



DAFTAR PUSTAKA

Dhiptaadmaja, Ketutsura, 2012. Studi Koordinasi Rele Arus Lebih, Recloser, Dan Fuse Cutout Pada Transformator 1 Gardu Induk Gianyar PT. PLN AJ Bali Timur. Tugas Akhir. ITS, Surabaya.

Doyle, Michael T. "Reviewing the Impacts of Distributed Generation on Distribution System Protection", IEEE. 2002.

IEEE Std 242-2001™, 2001, "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems", New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Kadarisman, Pribadi dan Sarimun N., Wahyudi. 2010. Proteksi Sistem Distribusi Tegangan Menengah. PT.PLN (Persero), Jakarta.

Prévé, Christophe. 2006. *Protection of Electrical Network*. Great Britain. United States: ISTE Ltd.

Saksomo, Setiyo. Tanpa Tahun. *Diktat Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Malang: Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Sarimun, Wahyudi. 2012. *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Depok: Garamond.

Stevenson, Jr. William D. 1996. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Cetakan kelima. Jakarta: Penerbit Erlangga.

Utomo, Teguh. 2010. *Diktat Kuliah Pembangkit Daya Elektrik*. Malang.

Vijeta, K. Siva Sarma, D.V.S.S. "Protection of Distributed Generation Connected Distribution System", Department of Electrical Engineering, NIT Warangal, India. 2012.

Wang Bo, Lan Ka. 2011. *Analysis of the Distributed Generation System and the Influence on Power Losses*. Korean: IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS.

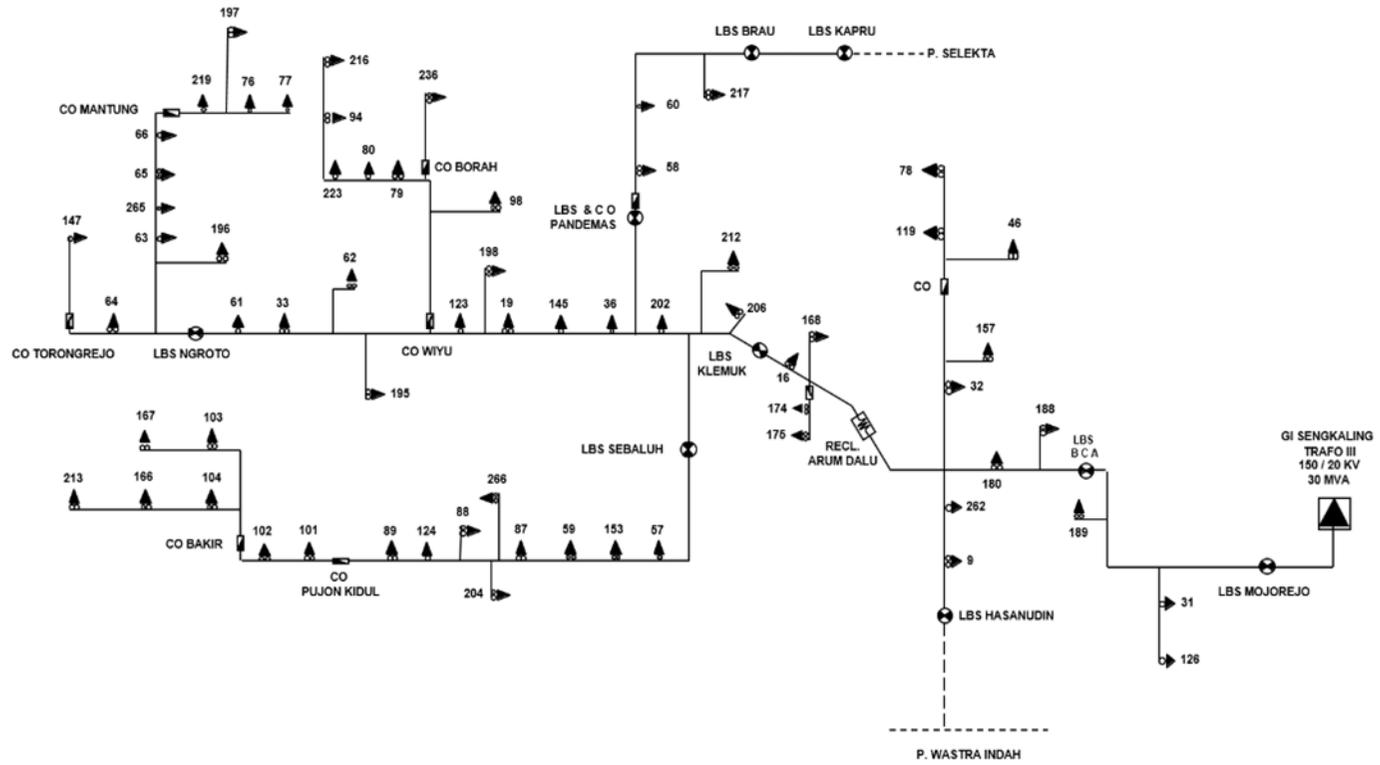
Mashau, T. Kibaara, S. Chowdhury, S. Chowdhury, S.P. "Impact of Distributed Generation on Protection Coordination in a Radial Distribution Feeder", University of Cape Town, South Africa. 2011.





LAMPIRAN

Lampiran 1 Single Line Diagram Penyulang Pujon



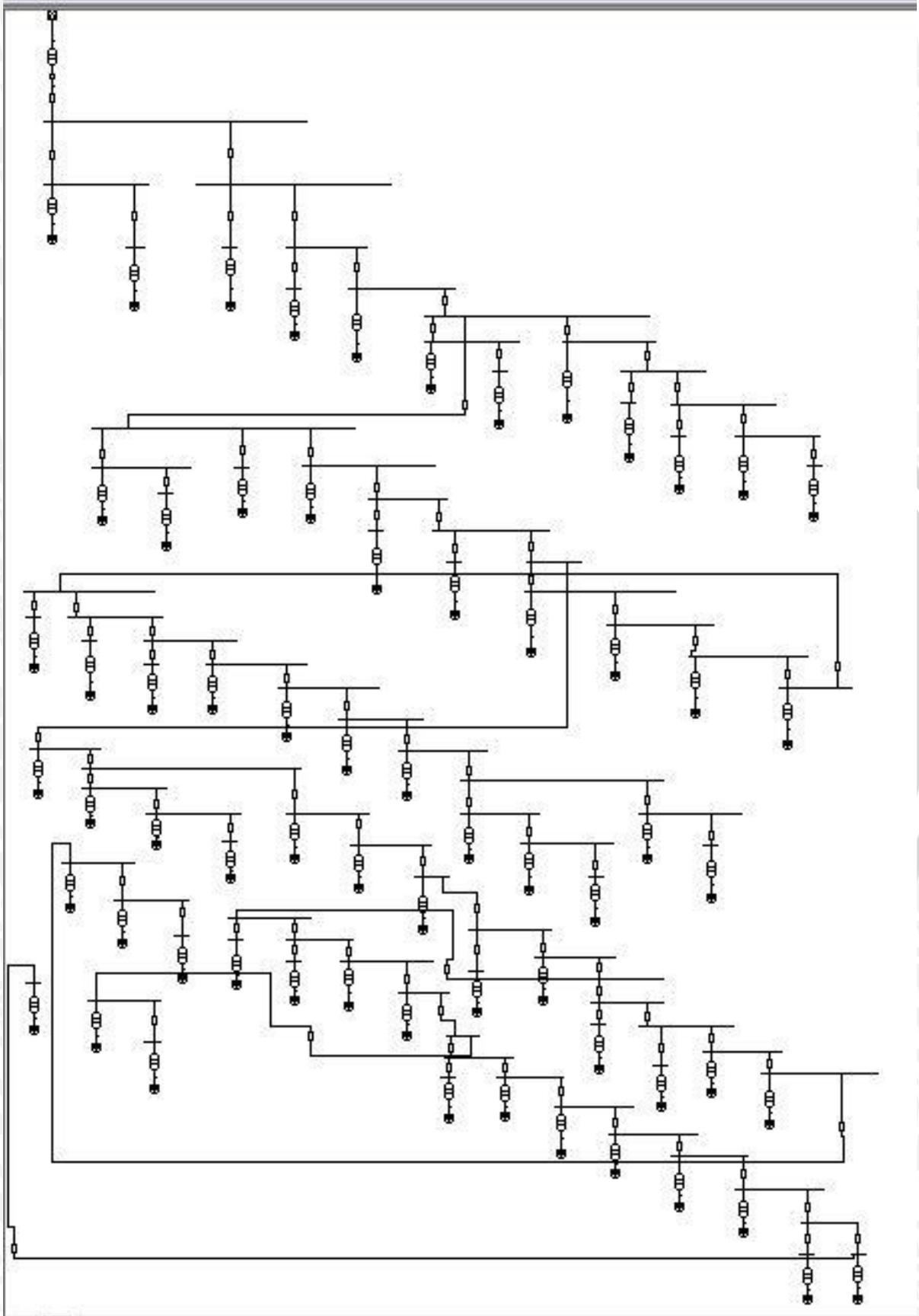
- GI
- CAPASITOR
- PGS
- AVS
- CO
- LBS
- RECLUSER
- SUTM 20 KV
- PCT

PT. PLN (PERSERO)
DISTRIBUSI JATIM
AP&J MALANG

P. PUJON
GI. SENGKALING

DIGAMBAR	DIPERIKSA	DISETUJUI
OPRST	SUJOKO	ZAINIRI

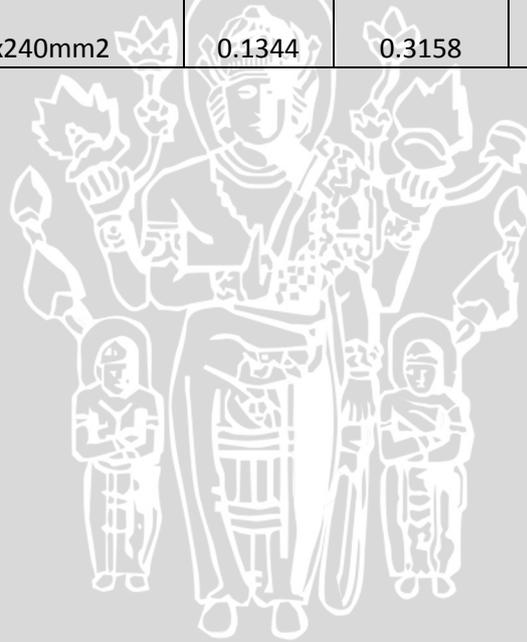
Lampiran 2 Gambar Rangkaian Penyulang Pujon



Lampiran 3 Impedansi saluran

Kode Saluran	Jenis saluran	R	X	KHA
M100	AAAC 3x25mm ²	1.2903	0.3895	135
M101	AAAC 3x35mm ²	0.9217	0.3790	155
M102	AAAC 3x50mm ²	0.6452	0.3678	195
M103	AAAC 3x55mm ²	0.5670	0.3678	215
M104	AAAC 3x70mm ²	0.4608	0.3572	255
M105	AAAC 3x95mm ²	0.3396	0.3449	200
M106	AAAC 3x110mm ²	0.2688	0.3376	325
M107	AAAC 3x150mm ²	0.2162	0.3305	405
M108	AAAC 3x240mm ²	0.1344	0.3158	525

Sumber : SPLN64



Lampiran 4 Daftar Trafo GI Sengkaling

Nomor Trafo	Merk	Type	Daya MVA	Teg (kV)		Arus (A)		Vektor Group	Sistem Pendingin	Impedansi (%)		
				Prim	Sek	Prim	Sek			Pada Tap Terendah	Pada Tap Teg Ref	Pada Tap Tertinggi
1	POUWELS	ORF 60 / 275	60	150	70	231	495	YNyn0 (d)	ONAN / ONAF	13.522	12.634	11.74
2	XIAN	FZ-30000/140	30	150	70	123.7	247.44	YNyn0 (d)	ONAN / ONAF	10.18	10.6	10.12
3	UNINDO	TTUB 150/30000	30	150	20	115	866	YNyn0 (d1)	ONAN / ONAF		12.5	
4	TELK	SALOCR	30	150	20	115	866		ONAN / ONAF	11.62	12.2	13.04

Nomor Trafo	Tap Changer					Nomor Serie	Tahun Buatan	Tahun Operasi
	Merk	Type	Teg. Tap Terendah (kV)	Teg. Tap Tertinggi (kV)	Selisih Teg. /Tap (kV)			
1	MR	MS III 300Y / 72,5/B/10192G	165750 / 70	127500 / 70	2250	3011070061	2008	2009
2	MR	VIII Y 200	161000	133000	1750	A95013-2	1995	1997
3	MR	VIII Y 200	165750	127500	2250	A-9415164	1994	1995
4	TELK	D2	165750	127500	2250	120349-2	1994	1998

Lampiran 5 Beban Trafo dan Penyulang Gardu Induk Sengkaling

AREA TIMUR		Trafo				No Urt	Cubicle / MV. Cell Penyulang	APJ	Beban Trafo dan Penyulang							
No GI	GARDU INDUK	No Trf	Prim	Sec	Daya (MVA)				Tertinggi				Rata-2			
			150 (kV)	20 (kV)					Sng (Amp)	tgl	Mlm (Amp)	tgl	Sng (Amp)	Mlm (Amp)		
5	SENGKALING	3	150	20	30		MERLIN GERIN		487	31	629	28	387	590		
						1	Junrejo	MLG	97	24	101	30	54	84		
						2	Pujon	MLG	126	24	175	31	92	169		
						3	Karang Ploso	MLG	168	31	207	31	140	188		
						4	Wastra Indah	MLG	149	31	148	31	91	137		
				4	150	20	60		GOLD STAR		927	31	947	31	619	829
							1	Selecta	MLG	249	31	219	31	123	210	
							2	Batu	MLG	273	31	213	31	133	154	
							3	Dinoyo	MLG	208	31	274	31	179	249	

Sumber: APJ Malang, 2014

Lampiran 6 Setting Relay Penyulang Gardu Induk Sengkaling Malang2014

Trafo				Cubicle / MV. Cell Penyulang	AMP / I.set (Amp)	CT	O C R				D G R											
No Trf	Prim 150	Sec 20	Daya				Merk	Type	No. Serie	Is> (A)	td> (det)	Is>> (A)	td>> (det)	Merk	Type	No. Serie	Io> (A)	to> (det)	Vo (volt)	Degr sudut	Io>>	to>>
3	150	20	30				MERLIN GERIN	1000														
				1 Jun Rejo	320	400/5	Micom	P127	36007937	320	0.05 SI	2000	Instant	Micom	P127	36007937	2	0.3 SI	2	0	4	0.4 SI
				2 Pujon	320	400/5	Micom	P127	36008074	320	0.05 SI	2000	Instant	Micom	P127	36008074	2	0.3 SI	2	0	4	0.4 SI
				3 Karang Ploso	320	400/5	Micom	P127	36007983	320	0.05 SI	2000	Instant	Micom	P127	36007983	2	0.3 SI	2	0	4	0.4 SI
				4 Wastra Indah	320	400/5	Micom	P127	36007991	320	0.05 SI	2000	Instant	Micom	P127	36007991	2	0.3 SI	2	0	4	0.4 SI
				kopel MG ke GS		1000/5	GEC	MCGG82	793470D	850	0.175											
				Spare			GEC	MCGG														
				Spare 2			GEC	MCGG														
4	150	20	60	GOLD STAR	1732																	
				1 Dinoyo	400	400/5	Micom	P127	36008062	400	0.05 SI	3500	Instant	Micom	P127	36008062	2	0.3 SI	2	0	4	0.4 SI
				2 Batu 20 kV	400	400/5	Micom	P127	36008042	400	0.05 SI	3500	Instant	Micom	P127	36008042	2	0.3 SI	2	0	4	0.4 SI
				3 Selecta	400	400/5	Micom	P127	36007931	400	0.05 SI	3500	Instant	Micom	P127	36007931	2	0.3 SI	2	0	4	0.4 SI
				4 Tegal Gondo	400	400/5	Micom	P127	36009376	400	0.05 SI	3500	Instant	Micom	P127	36009376	2	0.3 SI	2	0	4	0.4 SI
				Spare			GEC	MCGG						GEC	KCEU							
				Spare 2			GEC	MCGG						GEC	KCEU							

Lampiran 7 Kawat Penghantar

Kode dan Nama Penyulang		Panjang Total Saluran TM		AAAC								
		(ms)	(kms)	3x240	3x150	3x110	3x95	3x70	3x55	3x50	3x35	3x25
Junrejo	JREJO	23085	23.085	0	23.085	0	0	0	0	0	0	0
Karang Ploso	KRPLS	40079	40.079	0	0	0	0.02	34.781	0	5.278	0	0
Pujon	PUJON	60260	60.26	0	13.836	3.071	0	32.323	9.712	1.318	0	0
Wastra Indah	WSTIN	20074	20.074	0	5.557	0	3.438	5.814	4.244	1.021	0	0

Lampiran 8 Arus Hubung Singkat GI/GITET P3B Jawa Bali Semester Dua, Tahun 2012
Untuk Perhitungan Sistem Proteksi

No.	Bus	GI/GITET	Tegangan kV	Arus Hubung Singkat Max	
				1 ph (kA)	3 ph (kA)
701	A	PAITON5	150	39.24359	29.56359
702	B	PAITON5	150	24.4308	19.03639
703	I-5	PAKIS5	150	11.32801	14.83328
704	II-5	PAKIS5	150	11.32801	14.83328
705	I-5	PAMEKASAN5	150	1.970674	3.04275
706	I-5	PERAK5	150	23.46556	25.31542
707	II-5	PERAK5	150	23.46556	25.31542
708	I-5	PETRO KIMIA5	150	15.63848	21.94463
709	II-5	PETRO KIMIA5	150	15.63848	21.94463
710	I-5	PIER5	150	16.90451	20.94199
711	II-5	PIER5	150	16.90451	20.94199
712	I-5	PROBOLINGGO5	150	11.90961	16.28236
713	II-5	PROBOLINGGO5	150	11.90961	16.28236
714	I-5	PURWOSARI5	150	10.82924	000,015
715	II-5	PURWOSARI5	150	10.82924	000,015
716	I-5	REJOSO5	150	12.12211	16.43191
717	I-5	RUNGKUT5	150	28.19098	32.49989
718	II-5	RUNGKUT5	150	28.19098	32.49989
719	I-5	SAMPANG5	150	2.959229	4.44152
720	II-5	SAMPANG5	150	2.959229	4.44152
721	I-5	SAWAHAN5	150	41.41194	40.69395
722	II-5	SAWAHAN5	150	41.41194	40.69395
723	I-5	SEGOROMADU5	150	3.687996	4.42674
724	II-5	SEGOROMADU5	150	27.97355	34.43613
725	I-5	SEKARPUTIH5	150	9.959043	10.59141
726	II-5	SEKARPUTIH5	150	3.54171	000,005
727	I-5	SENGKALING5	150	6.779397	9.73581
729	I-5	SIMPANG5	150	18.31526	23.89826
730	II-5	SIMPANG5	150	18.31526	23.89826
731	I-5	SITUBONDO5	150	11.51845	15.19958
732	II-5	SITUBONDO5	150	11.51845	15.19958
733	I-5	SUKOLILO5	150	20.97952	26.49302
734	II-5	SUKOLILO5	150	20.97952	26.49302
735	I-5	SUMENEP5	150	1.433077	2.24769

Lampiran 9 Spesifikasi dan Performa Turbin

S52 - 600 kW - POWER CURVE AND TECHNICAL SPECIFICATIONS			
OPERATING DATA	Rated power	600 kW	
	Cut-in wind speed	4 m/s	
	Rated wind speed	13m/s	
	Cut-off wind speed	25m/s	
	Survival wind speed	59.5m/sec	
ROTOR	Type	3 Blades, Upwind / Horizontal axis	
	Diameter	52m	
	Rotational speed at rated power	24.19 rpm (fix speed machine, max over speed 28.29 rpm)	
	Rotor blade material	Epoxy bonded fiber glass	
	Swept area	2,124 m ²	
	Power regulation	Active pitch regulated	
GEARBOX	Type	One planetary stage and two helical stages	
	Ratio	1:63.6	
	Nominal load	660 kW	
	Type of cooling	Forced oil cooling lubrication system	
GENERATOR	Type	Single speed induction generator (asynchronous)	
	Speed at rated power	1,539 rpm	
	Rated power	600 kW	
	Rated voltage	690 V AC (phase to phase)	
	Frequency	50 Hz	
	Insulation	Class H	
	Enclosure	IP 56	
	Cooling system	Air cooled	
	Type	Lattice tower with bolted steel structure	
TOWER	Tower height	73m	
	Hub height	75m	
	BRAKING SYSTEM	Aerodynamic braking	3 Independent systems with blade pitching
	Mechanical braking	Electromechanical disc brake & mechanical rotor lock	
YAW SYSTEM	Type	Active electrical yaw motor	
	Bearing	Polyamide slide bearing	
	Protection	Cable twist sensor, proximity sensor	
PITCH SYSTEM	Type	3 Independent blade pitch control with battery backup for each blade	
	Operating range	-5° to 90°	
	Resolution	0.1° to 10° per sec	
CONTROLLER	Suzlon Control System with following salient features:		
	• Park slave	• Power output control / limitation	
	• Reactive power control	• Grid measurement	
	• Low voltage ride through (LVRT)	• Weather measurement	
	• Time synchronization	• Statistics	
	Wind Class	II a	
	Certification & standards	TC-GL-020C-2007 Rev. 1 GL standard	
	Quality system	ISO 9001:2008	

Performace

Wind Speed [m/s]	Power [kW]
4	30
5	57
6	99
7	157
8	234
9	334
10	458
11	600