



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator

Generator merupakan suatu mesin listrik yang mampu mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnet. Generator yang umum digunakan oleh pembangkit listrik adalah generator sinkron. Pemilihan generator sinkron sebagai pembangkit tenaga listrik disebabkan oleh karakteristik mesinnya yang mampu menghasilkan tegangan relatif konstan. Generator sinkron dengan defenisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet yang diputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor.

2.1.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron⁸

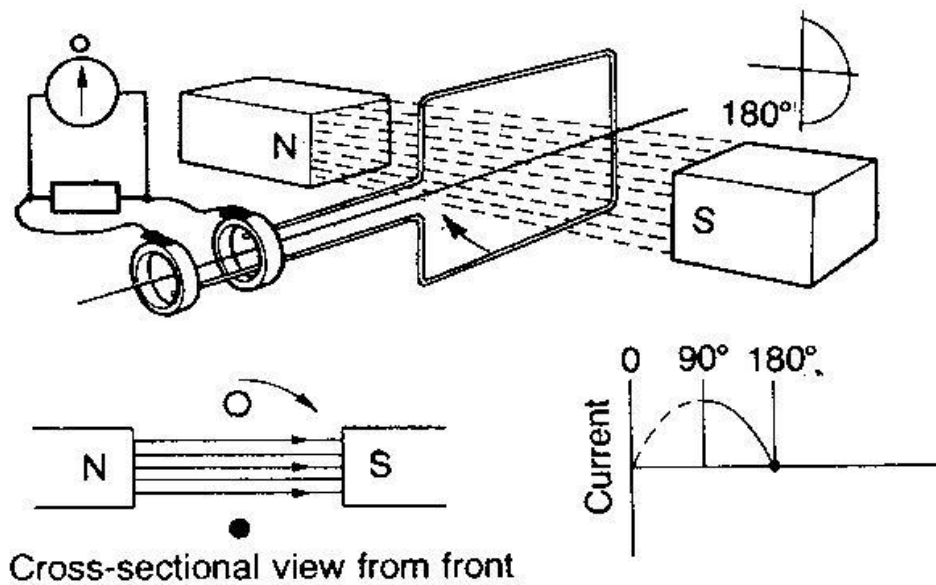
Prinsip kerja generator sinkron berdasarkan induksi elektromagnetik. Setelah rotor diputar oleh penggerak mula (*prime over*) dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Jika kumparan kutub disuplai oleh tegangan searah maka pada permukaan kutub akan timbul medan magnet (garis-garis gaya magnet) yang berputar kecepatannya sama dengan putaran kutub.

Berdasarkan Hukum Faraday apabila lilitan penghantar atau konduktor diputar memotong garis-garis gaya magnet yang diam atau lilitan yang diam dipotong oleh garis-garis gaya magnet yang berputar maka pada penghantar tersebut timbul EMF (*Electro Motive Force*) atau GGL (*Gaya Gerak Listrik*) atau tegangan induksi.

⁸ Juhari, Dipl.Eng, S.Pd. 2013. Generator. Jakarta. Hal : 5-10

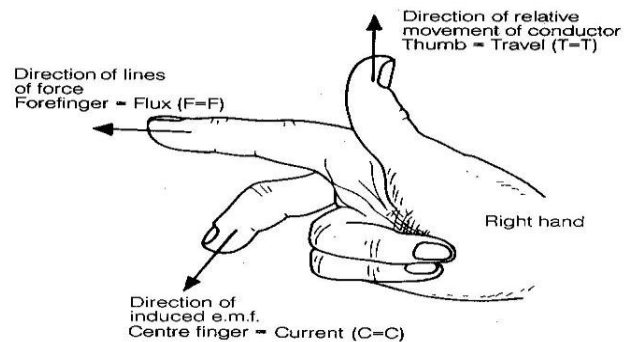


Ggl yang dibangkitkan pada penghantar jangkar adalah tegangan bolak-balik, perhatikan gambar 2.1. Arus yang mengalir pada penghantar jangkar karena beban tersebut akan membangkitkan medan yang berlawanan atau mengurangi medan utama sehingga tegangan terminal turun, hal ini disebut reaksi jangkar.



Gambar 2.1. GGL yang dibangkitkan⁸

Dalam menentukan arah arus dan tegangan (GGL atau EMF) yang timbul pada penghantar pada setiap detik berlaku Hukum tangan kanan Fleming perhatikan gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.2. Hukum tangan kanan Fleming⁸



Dimana :

1. Jempol menyatakan arah gerak F atau perputaran penghantar.
2. Jari telunjuk menyatakan arah medan magnet dari kutub utara ke kutub selatan.
3. Jari tengah menyatakan arah arus dan tegangan.

Ketiga arah tersebut saling tegak lurus seperti yang diperlihatkan pada gambar diatas. Garis-garis gaya magnet yang berputar tersebut akan memotong kumparan jangkar yang ada pada stator sehingga pada kumparan jangkar tersebut timbul GGL (gaya gerak listrik) atau EMF (*electro motive force*) atau tegangan induksi. Frekuensi tegangan induksi tersebut akan mengikuti persamaan sebagai berikut :

$$f = \frac{n.p}{120} \text{ (Hz)} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana : p = banyaknya kutub.

n = kecepatan putar (rpm).

Oleh karenanya frekuensi dari tegangan induksi tersebut di Indonesia sudah tertentu ialah 50 (Hz) dan jumlah kutub selalu genap maka putaran rotor, putaran kutub, putaran pengerak mula sudah tertentu pula.

2.1.2 Konstruksi Generator⁸

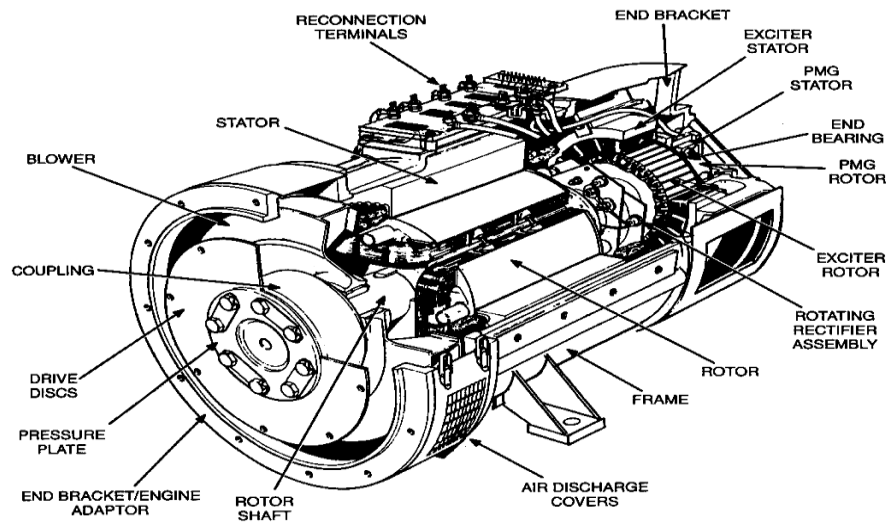
Konstruksi mesin sinkron baik untuk generator maupun untuk motor terdiri dari :

1. Stator adalah bagian yang diam dan berbentuk silinder.
2. Rotor adalah bagian yang berputar juga berbentuk silinder.
3. Celah udara adalah ruangan antara stator dan rotor.

2.1.2.1 Kontruksi Stator⁸

Kontruksi stator seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.3, terdiri dari :

1. Kerangka terbuat dari besi tuang untuk menyangga inti jangkar.
2. Inti jangkar terbuat dari besi lunak (baja silikon).
3. Alur (slot) untuk meletakkan belitan (kumparan).
4. Belitan jangkar terbuat dari tembaga yang diletakan pada alur (slot).
pengerak mula sudah tertentu pula.



Gambar 2.3. Kerangka dan Inti Stator Mesin Sinkron⁸

2.1.2.2 Kontruksi Rotor⁸

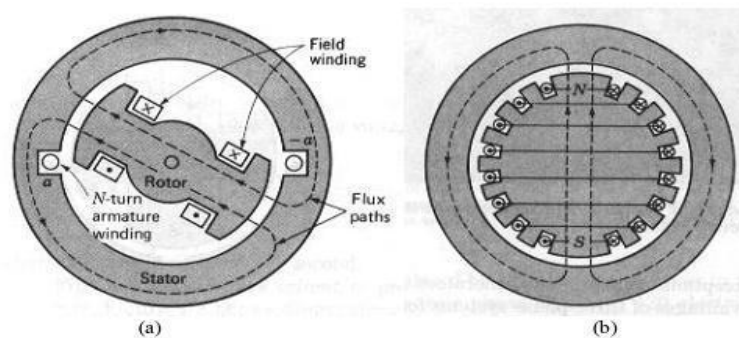
Kontruksi rotor terdiri dari dua jenis :

- a) Jenis kutub menonjol (*salient pole*) untuk generator kecepatan rendah dan menengah. Kutub menonjol terdiri dari inti kutub dan sepatu kutub. Belitan medan dililitkan pada badan kutub. Belitan kutub terbuat dari tembaga, sedangkan badan kutub dan sepatu kutub terbuat dari besi lunak.



b) Jenis kutub silinder untuk generator dengan kecepatan tinggi terdiri dari alur-alur sebagai tempat kumparan medan. Alur-alur tersebut terbagi atas pasangan-pasangan kutub.

Kedua macam kutub tersebut seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.4 berikut :



Gambar 2.4 Rotor jenis kutub silinder (a) dan silent (b)⁸

2.1.3 Gangguan Pada Generator⁹

Beberapa jenis gangguan dan masalah-masalah yang terdapat pada generator antara lain bisa disebutkan sebagai berikut ini :

2.1.3.1 Gangguan Listrik

Jenis gangguan ini adalah gangguan yang timbul dan terjadi pada bagian-bagian listrik dari generator. Gangguan-gangguan tersebut antara lain :

a. Hubung singkat 3 phasa

Terjadinya arus lebih pada stator yang dimaksud adalah arus lebih yang timbul akibat terjadinya hubungan singkat 3 phasa/ 3 phase *fault*. Gangguan ini akan menimbulkan loncatan bunga api dengan suhu yang tinggi yang akan melelehkan belitan dengan resiko terjadinya kebakaran,

⁹ Kris Hydroseptian. 2013. Perhitungan Penyetelan Frekuensi di PLTD Sungai Juaro. Palembang. Hal: 14.



jika isolasi tidak terbuat dari bahan yang anti api.

b. Stator hubung singkat 1 fasa ke tanah/*stator ground fault*

Kerusakan akibat gangguan 2 fasa atau antara konduktor kadang-kadang masih dapat diperbaiki dengan menyambung taping atau mengganti sebagian konduktor, tetapi kerusakan laminasi besi (*iron lamination*) akibat gangguan 1 fasa ke tanah yang menimbulkan bunga api dan merusak isolasi dan inti besi adalah kerusakan serius yang perbaikannya dilakukan secara total. Gangguan jenis ini meskipun kecil harus segera diproteksi.

c. Rotor hubung tanah/*field ground*

Pada rotor generator yang belitannya tidak dihubungkan oleh tanah (*ungrounded system*). Bila salah satu sisi terhubung ke tanah belum menjadikan masalah. Tetapi apabila sisi lainnya terhubung ke tanah, sementara sisi sebelumnya tidak terselesaikan maka akan terjadi kehilangan arus pada sebagian belitan yang terhubung singkat melalui tanah. Akibatnya terjadi ketidakseimbangan fluksi.

d. Tegangan lebih/*Over voltage*

Tegangan yang berlebihan melampaui batas maksimum yang diijinkan dapat berakibat tembusnya (*breakdown*) yang akhirnya akan menimbulkan hubungan singkat antara belitan. Tegangan lebih dapat dimungkinkan oleh mesin putaran lebih/*overspeed* atau kerusakan pada pengatur tegangan otomatis/*AVR*.

e. Kehilangan medan penguat/*Loss of excitation*

Hilangnya medan penguat akan membuat putaran mesin naik, dan berfungsi sebagai generator induksi. Kehilangan medan penguat dapat dimungkinkan oleh :

a) Jatuhnya/trip saklar penguat (41AC)



- b) Hubung singkat pada belitan penguat
- c) Kerusakan pada sistem AVR

2.1.3.2 Gangguan Mekanis/Panas⁹

Jenis-jenis gangguan mekanik/panas antara lain :

- a. Generator berfungsi sebagai motor (*motoring*)

Motoring adalah peristiwa berubah fungsi generator menjadi motor akibat daya balik (*reverse power*). Daya balik terjadi disebabkan oleh turunnya daya masukan dari penggerak utama. Dampak kerusakan akibat peristiwa motoring adalah lebih kepada penggerak utama itu sendiri. Pada turbin uap, peristiwa motoring akan mengakibatkan pemanasan lebih pada sudu-sudunya, dan ketidakstabilan pada sudu turbin gas.

- b. Kesalahan paralel

Kesalahan dalam memparalel generator karena syarat-syarat sinkron tidak terpenuhi dapat mengakibatkan kerusakan pada bagian poros dan penggerak utamanya. Kemungkinan kerusakan lain yang timbul, kerusakan PMT dan kerusakan pada kumparan stator akibat adanya kenaikan tegangan sesaat.

- c. Gangguan pendingin stator

Gangguan pada media sistem pendingin stator (pendingin dengan media udara, hidrogen, atau air) akan menyebabkan kenaikan suhu belitan stator. Apabila suhu belitan melampaui batas ratingnya akan berakibat kerusakan belitan.



2.1.3.3 Gangguan Sistem⁹

Generator dapat terganggu akibat adanya gangguan yang datang/terjadi pada sistem. Gangguan-gangguan sistem yang terjadi umumnya adalah :

a. Frekuensi operasi yang tidak normal

Perubahan frekuensi keluar dari batas-batas normal di system dapat berakibat ketidakstabilan pada turbin generator. Perubahan frekuensi sistem dapat dimungkinkan oleh tripnya unit-unit pembangkit atau penghantar (transmisi).

b. Lepas sinkron

Adanya gangguan di sistem akibat perubahan beban mendadak, switching, hubung singkat dan peristiwa yang cukup besar akan menimbulkan ketidakstabilan sistem. Apabila peristiwa ini cukup lama dan melampaui batas-batas ketidakstabilan generator, generator akan kehilangan kondisi paralel. Keadaan ini akan menghasilkan arus puncak yang tinggi dan penyimpangan frekuensi operasi yang keluar dari seharusnya sehingga akan menyebabkan terjadinya stress pada belitan generator, dan akan merusak turbin generator. Pada kondisi ini generator harus dilepas dari sistem.

2.2 Cadangan Berputar dan Pelepasan Beban⁵

Apabila sebuah unit pembangkit mempunyai kapasitas 100 MW tetapi hanya dibebani 60MW, maka selisih antara kapasitas 100 MW dengan beban 60 MW, yaitu sebesar 40 MW, merupakan cadangan berputar yang ada pada unit

⁵ Djiteng Marsudi, Ir. 2011. Pembangkit Energi Listrik Edisi Kedua. Jakarta. Hal. 50



pembangkit tersebut.

Cadangan berputar, baik dalam sistem interkoneksi maupun dalam sistem yang berdiri sendiri (Terisolasi/Isolated) diperlukan untuk mengatur frekuensi. Hal ini disebabkan pengaturan frekuensi memerlukan tersedianya daya MW setiap saat.

Pengaturan frekuensi seperti diuraikan pada uraian sebelumnya, dilakukan oleh *governor*. *Governor* turbin air akan membuka katup air dari turbin air lebih lebar untuk menambah air penggerak turbin apabila frekuensi turun. Begitu juga pada turbin uap, *governor* akan menambah pemberian uap penggerak turbin apabila terjadi penurunan frekuensi. Hal ini semua memerlukan adanya cadangan berputar pada PLTA atau PLTU.

Pada unit Pembangkit PTLD dan PLTG, *governor* akan langsung menambah bahan bakar melalui pengaturan katup bahan bakar untuk menambah MW dan mencegah penurunan frekuensi. Dalam hal ini juga diperlukan cadangan berputar.

Dengan turunnya frekuensi (kemudian diikuti langkah penggunaan cadangan berputar seperti diuraikan diatas). Cadangan berputar dalam sistem menjadi berkurang. Turunnya frekuensi dalam sistem yang memerlukan penambahan pembangkitan daya MW yang diambil dari cadangan berputar dapat disebabkan karena 2 hal yaitu :

- a. Bertambahnya beban dalam sistem
- b. Terjadinya gangguan unit pembangkit sehingga keluar dari operasi.

Butir a harus diantisipasi dengan membuat perkiraan beban sistem yang teliti, kemudian diikuti dengan perencanaan pembangkitan yang tepat, termasuk perencanaan cadangan berputarnya.

Butir b, yaitu terjadinya gangguan unit pembangkit, merupakan sesuatu yang tidak dapat dihindarkan, walaupun tidak dikehendaki. Untuk itu, perlu ada pedoman operasi dalam mengatasi gangguan, apabila sampai terjadi gangguan.

Gangguan seperti tersebut dalam butir b menyebabkan frekuensi turun, *governor* dari unit yang tidak terganggu yang masih beroperasi akan



menggunakan cadangan berputar yang masih ada untuk mempertahankan frekuensi tidak berubah. Cadangan berputar ini bisa terus turun dan bisa habis. Apabila cadangan berputar telah habis tetapi frekuensi masih terus turun, sistem bersangkutan dapat mengalami gangguan total, dalam arti semua unit pembangkit akhirnya trip (keluar dari operasi) karena semuanya mengalami pembebanan lebih.

Untuk mencegah terjadinya gangguan total, perlu dilakukan pelepasan beban sewaktu frekuensi terus turun. Pelepasan beban ini dilakukan dengan menggunakan rele frekuensi rendah (*Under Frequency relay*). Rele frekuensi rendah, misalnya disetel dengan tiga tahap yaitu 49,50; 49,00; dan 48,50 hertz dan dipasang pada penyulang distribusi untuk tahap 1 dan tahap 2 sedangkan untuk tahap 3 dipasang pada saluran transmisi.

Perkembangan terakhir dalam teknik pelepasan beban juga menggunakan rele yang mendeteksi kecepatan turunya frekuensi $\frac{dF}{dP}$. Pada gangguan yang relatif besar, laju penurunan frekuensi sistem juga besar dan rele $\frac{dF}{dP}$ akan bekerja.

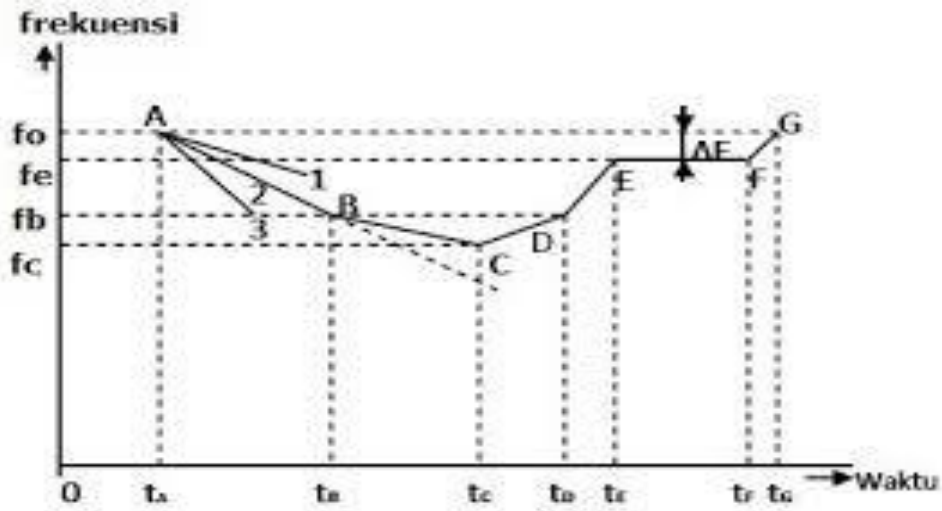
2.3 Pelepasan Beban (*Load Shedding*)⁴

Jika terdapat gangguan dalam sistem yang menyebabkan daya tersedia tidak dapat melayani beban, misalnya karena ada unit pembangkit yang besar jatuh (trip), maka dilakukan pelepasan beban. Keadaan yang kritis dalam sistem karena jatuhnya unit pembangkit dapat dideteksi melalui frekuensi sistem yang menurun dengan cepat.

Hal ini dapat digambarkan dalam gambar 2.5 pada saat $t = t_A$ ada unit pembangkit yang jatuh sehingga frekuensi menurun. Turunnya frekuensi dapat menurut garis 1, garis 2, atau garis 3. Makin besar unit pembangkit yang jatuh (makin besar daya tersedia yang hilang) makin cepat frekuensi menurun. Kecepatan menurunnya frekuensi juga tergantung kepada besar kecilnya inersia

⁴ Gefito Paulima Aritonang. 2012. Rele Frekuensi Turun sebagai perangkat sistem pelepasan beban pada jaringan distribusi daya listrik di PT. Pertamina RU III Plaju. Palembang. Hal. 25-27

sistem. Makin besar inersia sistem, makin kokoh sistemnya, makin lambat turunnya frekuensi.



Gambar 2.5 Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban⁴

Dalam gambar 2.5 dimisalkan bahwa frekuensi menurun menurut garis 2. Setelah mencapai titik B dilakukan pelepasan beban tingkat pertama oleh Rele Frekuensi Kurang (UFR) dengan bekerja setelah mendeteksi frekuensi sebesar F_B . Dengan adanya pelepasan beban tingkat pertama maka penurunan frekuensi berkurang kecepatannya, sampai titik C UFR mendeteksi frekuensi sebesar F_C dan akan melakukan pelepasan beban tingkat kedua.

Setelah pelepasan beban tingkat kedua frekuensi sistem tidak lagi menurun tapi menunjukkan gejala yang baik yaitu naik kembali menuju titik D. Naiknya frekuensi dari titik C menuju titik D disebabkan karena daya yang masih tersedia dalam sistem adalah lebih besar daripada beban setelah mengalami pelepasan beban tingkat kedua. Mulai dari titik D, yaitu setelah proses tersebut diatas berlangsung selama T_D . Governor unit-unit pembangkit dalam sistem mulai melakukan pengaturan primer.



T_D berkisar sekitar 4 detik. Periode sebelum *governor* melakukan pengaturan primer disebut periode transien dan ini berlangsung selama kira-kira 4 detik.

Setelah *governor* melakukan pengaturan primer maka frekuensi mencapai titik FE yaitu kondisi pada titik E. Kemampuan *governor* melakukan pengaturan primer sangat tergantung kepada besarnya cadangan berputar yang masih tersedia dalam sistem. Seandainya unit-unit pembangkit yang masuk (paralel) ke dalam sistem mempunyai kemampuan pembangkitan 100 MW tetapi bebannya baru 70 MW maka dikatakan bahwa cadangan berputar masih $100-70 = 30$ MW. Setelah mencapai titik E masih ada deviasi frekuensi sebesar F terhadap frekuensi yang diinginkan yaitu F_o dan deviasi ini dikoreksi dengan pengaturan sekunder yang dimulai pada titik F dan frekuensi menjadi normal kembali pada titik G.

Apabila unit pembangkit yang jatuh tidak begitu besar mungkin penurunan frekuensi tidak pernah mencapai nilai F_c sehingga dalam hal ini pelepasan beban tingkat pertama saja sudah cukup.

Dalam praktek pelepasan beban (*load shedding*) dilakukan dengan memasang UFR pada berbagai pembangkit distribusi yang dipilih menurut kondisi setempat. Jumlah UFR harus sedikitnya cukup melepas beban sebesar unit terbesar dalam sistem.

2.4 Sistem Proteksi⁹

Proteksi terhadap tenaga listrik ialah sistem pengamanan yang dilakukan terhadap peralatan-peralatan listrik, yang terpasang pada sistem tenaga listrik tersebut. Misalnya Generator, Transformator, Jaringan transmisi / distribusi dan lain-lain terhadap kondisi operasi abnormal dari sistem itu sendiri atau mengalami gangguan. Seperti yang telah dijelaskan gangguan-gangguan pada generator.

⁹ Muhammad Taqiyyuddin Alawiy. 2006. Sistem Proteksi Tenaga Listrik. Malang. Hal : 2



Adapun fungsi dari sistem proteksi adalah:

- a. Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat adanya gangguan (kondisi abnormal). Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan, maka akan semakin sedikitlah pengaruh gangguan terhadap kemungkinan kerusakan alat.
- b. Untuk mempercepat melokalisasi luas/*zone* daerah yang terganggu, sehingga daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin.
- c. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen, dan juga mutu listriknya baik.
- d. Untuk mengamankan manusia (terutama) terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

Agar sistem proteksi dapat dikatakan baik dan benar (dapat bereaksi dengan cepat, tepat dan murah), maka perlu diadakan pemilihan dengan seksama dan dengan memperhatikan faktor-faktor sebagai berikut :

1. macam saluran yang diamankan.
2. pentingnya saluran yang dilindungi.
3. kemungkinan banyaknya terjadi gangguan.
4. tekno-ekonomis sistem yang digunakan.

Peralatan utama yang dipergunakan untuk mendeteksi dan memerintahkan peralatan proteksi bekerja adalah rele.

2.4.1 Syarat-syarat Rele Pengaman⁹

Syarat-syarat agar peralatan rele pengaman dapat dikatakan bekerja dengan baik dan benar adalah :

2.4.1.1 Cepat bereaksi

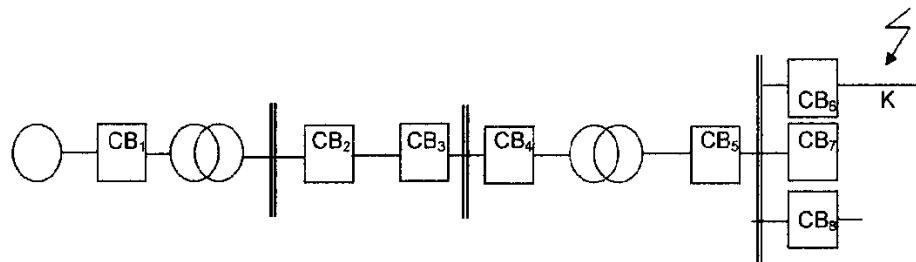
Relay harus cepat bereaksi / bekerja bila sistem mengalami gangguan atau kerja abnormal. Kecepatan bereaksi dari relay adalah saat relay



mulai merasakan adanya gangguan sampai dengan pelaksanaan pelepasan pemutus tenaga (CB) karena komando dari relay tersebut. Waktu bereaksi ini harus diusahakan secepat mungkin sehingga dapat menghindari kerusakan pada alat serta membatasi daerah yang mengalami gangguan / kerja abnormal. Mengingat suatu sistem tenaga mempunyai batas-batas stabilitas serta kadang-kadang gangguan sistem bersifat sementara, maka relay yang semestinya bereaksi dengan cepat kerjanya perlu diperlambat (time delay).

2.4.1.2 Selektif

Selektif adalah kecermatan pemilihan dalam mengadakan pengamanan, dimana hal ini menyangkut koordinasi pengamanan dari sistem secara keseluruhan. Untuk mendapatkan keandalan yang tinggi, maka relay pengaman harus mempunyai kemampuan selektif yang baik. Dengan demikian, segala masekecil mungkin. Berikut diberikan contohnya pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Suatu Sistem Tenaga Listrik Yang Mengalami Gangguan di Titik K

Dalam sistem tenaga listrik seperti gambar di atas, apabila terjadi gangguan pada titik K, maka hanya CB 6 saja yang boleh bekerja sedangkan untuk CB 1, CB 2 dan CB 3 – CB 8 yang lain tidak boleh bekerja,



2.4.1.3 Peka / sensitif

Relay harus dapat bekerja dengan kepekaan yang tinggi, artinya harus cukup sensitif terhadap gangguan didaerahnya meskipun gangguan tersebut minimum, selanjutnya memberikan jawaban /*response* .

2.4.1.4 Andal / reliability

Keandalan relay dihitung dengan jumlah relay bekerja/ mengamankan cukup baik bila mempunyai harga : 90 % - 99%. Misal, dalam satu tahun terjadi gangguan sebanyak 25 X dan relay dapat bekerja dengan sempurna sebanyak 23 kali, maka :

$$\text{keandalan relay} = \frac{23}{25} \times 100\% = 92\%$$

Keandalan dapat di bagi 2 :

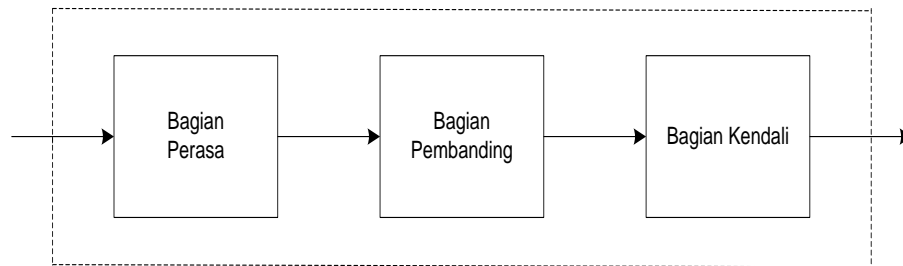
- 1) *Dependability* : relay harus dapat diandalkan setiap saat.
- 2) *Security* : tidak boleh salah kerja / tidak boleh bekerja yang bukan seharusnya bekerja.

2.4.1.5 Sederhana

Makin sederhana sistem relay semakin baik, mengingat setiap peralatan/ komponen relay memungkinkan mengalami kerusakan. Jadi sederhana maksudnya kemungkinan terjadinya kerusakan kecil (tidak sering mengalami kerusakan).

2.4.2 Bagian Umum dari suatu Sistem Proteksi⁶

Sistem proteksi umumnya terdiri dari tiga bagian seperti pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Bagian umum dari suatu proteksi

a) Bagian Perasa (*sensing element*)

Pada bagian ini, perubahan dari besaran ukur yang dirasakan selanjutnya diteruskan kebagian perbandingan.

b) Bagian Perbandingan (*comparing element*)

Yang akan membandingkan dan menentukan apakah besaran ukur itu masih dalam keadaan normal atau tidak.

c) Bagian Kendali

Pada bagian ini pembukaan circuit breaker (PMT) atau pemberian tanda/signal diatur dan dilaksanakan.

2.5 Rele Frekuensi⁶

Frekuensi merupakan salah satu parameter yang dapat menunjukkan keadaan yang tidak normal pada suatu sistem tenaga listrik. Berkurangnya daya pembangkit akan mengakibatkan turunnya putaran pembangkit dan turunnya frekuensi, keadaan ini mutlak perlu dihindari sebab akan mengganggu kestabilan dari sistem tenaga listrik, hal ini diatasi dengan memasang pengaman yang perlu

⁶ Ir.H.Hazairin Samaulah. M.Eng., Ph.D. 2004. Dasar-dasar Sistem Proteksi Teknik Listrik. Palembang. Hal : 65



diperhatikan dan di pertimbangkan. Pada umumnya rele frekuensi ini digunakan untuk :

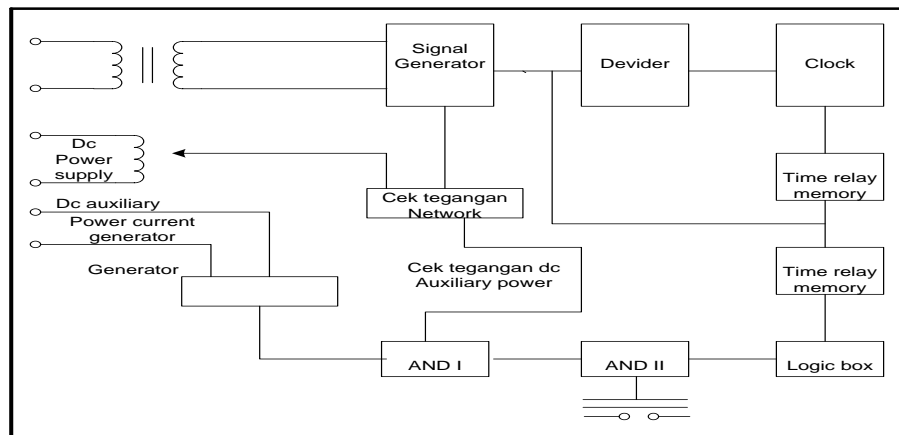
- a. Mendeteksi frekuensi sistem tenaga listrik atau generator.
- b. Menjaga frekuensi sistem tenaga atau generator pada suatu harga tertentu
- c. Melepaskan beban lebih bila frekuensi turun dibawah harga yang telah disetting.

Pemilihan rele ini perlu ditinjau kemampuannya dan ada beberapa yang perlu diperhatikan dan dipertimbangan :

- a. Bagi rele pengaman sangat penting untuk mengetahui keadaan tidak normal dan kemudian mengamankannya dengan memperhatikan kemampuan untuk kembali keadaan semula/ normal secara otomatis
- b. Kemampuan selektif suatu keadaan normal harus segera kembali kekeadaan normalnya dengan cara pelepasan beban seminimum mungkin setelah gangguan terjadi.
- c. Kepekaan rele harus bekerja sedemikian telitinya sehingga pada keadaan bagaimanapun kekurangan pembangkitan dapat dirasakan dan dengan kecepatan kerja tertentu.
- d. Waktu kerja. Dalam hal tertentu rele harus bekerja dalam waktu singkat dan dalam keadaan lain rele dapat juga bekerja dalam waktu tertunda, yang mana semua ini ditentukan oleh kejadian sistem dan kecepatan kerja dari alat-alat pada sistem tersebut.

2.5.1 Prinsip Kerja Rele Frekuensi⁶

Cara kerja rele frekuensi perhatikan blok diagram pada gambar 2.8 Besaran ukuran adalah frekuensi sitem diambil dengan menggunakan transformator tegangan. Besaran frekuensi adalah searah yang biasanya disebut dengan *Auxiliary Power*.



Gambar 2.8. Blok Diagram rele frekuensi

Keterangan gambar 2.8. adalah :

1. Generator Sinyal

Sebagai input, menghasilkan output dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi sistem dan output ini akan diteruskan ke *devider*.

2. *Devider*

Sebagai pembagi yang mempunyai output akan menjadi input pada *clock*.

3. *Clock*

Clock ini mempunyai referensi signal konstan dengan sumber untuk referensi sinyal ini adalah *Auxiliary Power* yang berupa arus searah. Bila dimisalkan frekuensi dari referensi adalah $F1$ dan frekuensi dari sistem adalah f , maka kedua frekuensi ini akan dibandingkan didalam *clock*.

4. *Logic Box*

Input untuk *logic Box* adalah *output* dari *clock*. *Logic box* mempunyai binary counter dan akan menghasilkan output dengan harga 1 dan 0.

5. Tegangan Referensi

Tegangan referensi mempunyai harga yang konstan dan disuplai dngan arus searah dan berfungsi untuk mencegah tegangan input dari sistem yang diproteksi.



6. *Current Transformator*

Current generator berfungsi untuk mengecek apakah *Auxiliary power* tetap konstan maka outputnya akan masuk di AND II, bersama-sama tegangan input yang sudah dibandingkan dengan tegangan referensi.

7. AND II

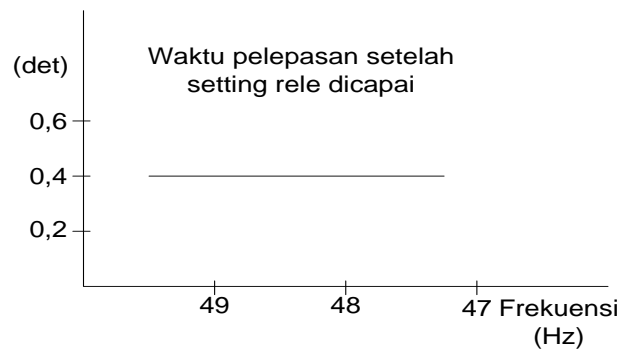
Output dari *logic* bersama-sama dengan sinyal dari AND I masuk ke *circuit* AND II keluar sinyal yang diteruskann ke *auxiliary* rele untuk membuka atau menutup *circuit breaker* (CB).

2.5.2 Rele Frekuensi dengan penyetelan frekuensi⁴

2.5.2.1 Kelambatan waktu yang tetap

Rele Frekuensi Kurang yang bekerja atas dasar frekuensi, diset pada suatu harga frekuensi dibawah normal tertentu dan akan memberikan perintah kepada bagian kendali yang biasanya berupa rele bantu (*auxiliary relay*), segera apabila frekuensi sistem turun dan mencapai harga settingnya. Selanjutnya rele bantu akan menentukan waktu kapan perintah pelepasan pemutus daya dilaksanakan. Disini dikenal apa yang disebut dengan kelambatan waktu yang tetap, yaitu waktu yang diperlukan oleh rele bantu dan waktu rele ini menerima perintah dari rele utama sama bekerjanya pemutus daya. Untuk bermacam-macam harga *setting* rele, kelambatan waktu rele selalu menunjukkan harga yang tetap. Jadi, misalnya rele frekuensi kurang diset pada frekuensi 48,5 Hz. Pelepasan pemutus daya baru dilakukan 0,5 detik kemudian, dari sejak rele utama merasakan frekuensi sistem pada harga settingnya. Pada waktu pelepasan beban terjadi frekuensi sistem telah turun dan mencapai harga di bawah 48,5 Hz jadi rele ini waktu kerjanya tidak dipengaruhi oleh kecepatan penurunan frekuensi. Pada gambar 2.9 dapat dilihat suatu contoh karakteristik rele dengan kelambatan waktu tetap.

⁴ Gefito Paulima Aritonang. 2012. Rele Frekuensi Turun sebagai perangkat sistem pelepasan beban pada jaringan distribusi daya listrik di PT. Pertamina RU III Plaju. Palembang. Hal. 30-33

Gambar 2.9. Karakteristik rele kelambatan waktu tetap⁴

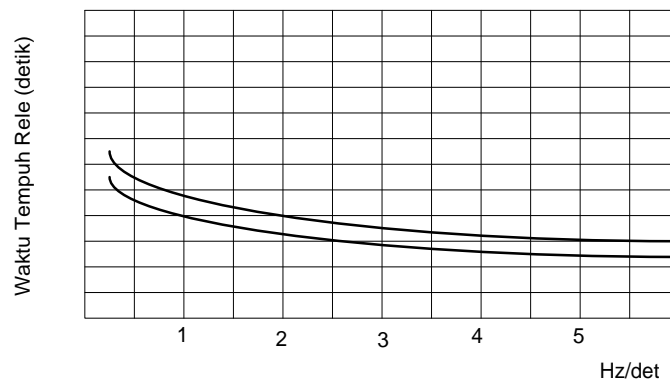
2.5.2.2 Keterlambatan waktu pada laju perubahan frekuensi⁴

Rele frekuensi yang bekerja atas dasar frekuensi dan laju perubahan frekuensi disamping mengukur frekuensi juga laju penurunan frekuensi. Artinya bagian kontrol mengatur kelambatan waktu pemutusan sebagai fungsi dari laju perubahan frekuensi. Makin cepat penurunan frekuensi, maka makin cepat waktu kerja rele. waktu kerja relenya dapat dilihat pada karakteristik rele tersebut. Pada gambar 2.10 diberikan salah satu contoh karakteristik rele tersebut yang menunjukkan hubungan waktu kerja rele dengan laju perubahan frekuensi. Jadi pada setiap tingkat pelepasan beban, waktu kerja rele selalu berubah mengikuti laju perubahan frekuensi. Suatu kelebihan rele jenis ini dibandingkan dengan jenis rele yang bekerja atas dasar frekuensi saja adalah selektivitasnya terhadap kelebihan beban. Artinya dengan penggunaan rele jenis ini, ada keadaan kelebihan beban tertentu yang tidak memerlukan pelepasan beban tertentu atau memperlambat waktu pelepasan beban. Dengan demikian memberi kesempatan pada sistem mengembalikan ke frekuensi nominalnya secara natural tanpa perlu melepaskan beban, sehingga tidak terjadi pelepasan beban yang tidak perlu. Sedangkan untuk keadaan kelebihan beban yang besar, dimana laju perubahan frekuensi besar maka waktu pelepasan menjadi sangat singkat.



Sedangkan untuk kelebihan beban yang besar, misalnya 50% pada 48,5 Hz memberi laju penurunan frekuensi yang tinggi. Hal ini memberi kelambatan waktu yang lebih singkat, sehingga bagian kendali akan memberi perintah pelepasan beban lebih cepat. Beberapa kekurangan dalam penggunaan rele jenis ini antara lain :

- Penetapan setting frekuensi yang lebih sukar
- Karena adanya tambahan alat-alat atau rangkaian khusus untuk mengatur laju perubahan frekuensi maka harga relative lebih mahal.



Gambar 2.10. Karakteristik rele perubahan frekuensi dengan waktu kerja⁴

2.5.2.3 Rele Frekuensi dengan penyetelan $\frac{df}{dt}$

Rele frekuensi selain dengan penyetelan frekuensi (f) ada juga yang dapat disetting dengan laju perubahan frekuensi ($\frac{df}{dt}$). Dengan adanya penyetelan $\frac{df}{dt}$ dalam hal kekurangan pembangkit yang cukup besar (laju penurunan frekuensi besar), maka diperoleh ketepatan dan kecepatan pelepasan beban yang tinggi. Pada gambar 2.11, ditunjukkan karakteristik kerja rele penyetelan $\frac{df}{dt}$ sebagai fungsi dari (f). Dibawah ini ditunjukkan hubungan penyetelan $\frac{df}{dt}$ dengan $\frac{df}{dt}$ pada frekuensi f_x sebagai berikut :

$$\frac{df}{dt} (\text{pada } f_x) = \left(\frac{f_x}{f_o}\right) \cdot \left(\frac{df}{dt} \text{ setting}\right) \dots\dots\dots(2.2)$$



Dengan f_0 = frekuensi dasar

f_x = penyetelan frekuensi

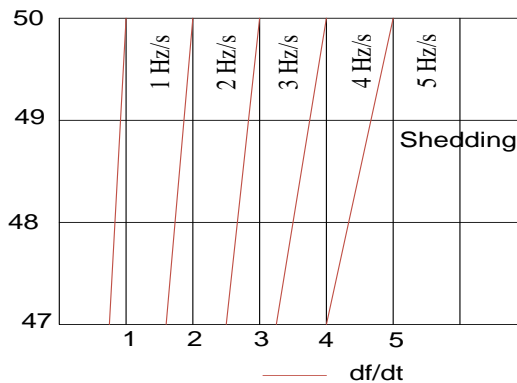
Untuk sistem dengan frekuensi dasar 50 Hz, maka :

$$\frac{df}{dt} \text{ (pada } f_x) = \left(\frac{f_x}{f_0}\right) \cdot \left(\frac{df}{dt} \text{ pada } 50 \text{ Hz}\right) \dots\dots\dots(2.3)$$

Waktu tunda time *delay* tergantung pada jenis rele frekuensi yang digunakan. Ada 3 kriteria yang harus dipenuhi agar rele dengan penyetelan

$\frac{df}{dt}$ dapat bekerja, yaitu:

- Frekuensi harus berada dibawah penyetelan frekuensi.
- Harga $\frac{df}{dt}$ harus lebih besar dari penyetelan $\frac{df}{dt}$
- Harga $\frac{df}{dt}$ harus tetap lebih besar dari penyetelan untuk semua waktu yang diset.



Gambar 2.11. Karakteristik kerja rele penyetelan df/dt^4

2.5.3 Standar Frekuensi Kerja Generator Turbin Gas¹

Menurut standar IEEE.std.c37.106.1987 mengatur tentang fluktuasi frekuensi dimana batas rele frekuensi lebih sebesar + 0,8 % dari frekuensi nominal, sedangkan untuk batas rele frekuensi kurang sebesar – 0,8 % dari frekuensi nominalnya. Berikut standar IEEE.std.c37.106.1987 dapat dilihat pada table 2.1.

¹ Addi Permadani. 2013. Skenario Pelepasan Beban menggunakan software ETAP 6.0.0 sebagai pengaman GTG di PT.PUSRI Palembang. Palembang. Hal : 20



Tabel 2.1 Batas Durasi Rele Frekuensi Lebih dan Rele Frekuensi Lebih yang telah diubah dalam persen.

Batas Frekuensi Kurang	Batasan Frekuensi Lebih	Minimum time
50 - 49,6 Hz (100 - 99,2%)	50,0 - 50,4 Hz (100,0 - 100,8%)	N/A (continuous operating range)
49,7 - 48,3 Hz (97,3 - 96,5%)	50,5 - 51,2 Hz (101,0 - 102,5%)	3
48,2 - 47,8 Hz (96,3 - 95,7%)	51,3 - 51,4 Hz (102,7 - 102,8%)	30
48,2 - 47,8 Hz (96,3 - 95,7%)		7,5
47,7 - 47,4 Hz (95,5 - 94,8%)		45
47,3 - 47,1 Hz (94,7 - 94,2%)		7,2
Less than 47,0 Hz	Greater than 51,4 Hz	Instantaneous trip

2.6 Pengaturan Rele Frekuensi Menurun²

Pada pelepasan beban yang diakibatkan oleh penurunan frekuensi dibutuhkan suatu Rele Frekuensi Menurun yang dapat mendeteksi ketidaknormalan tersebut. Sinyal ketidaknormalan tersebut selanjutnya disampaikan ke pemutus tenaga yang terpasang di beban yang ingin dilepaskan. Agar memberikan performa maksimal terhadap sistem, perlu dilakukan beberapa pengaturan terhadap rele frekuensi menurun. Beberapa parameter yang harus diatur terlebih dahulu antara lain:

- a. Frekuensi kerja rele
- b. Waktu operasi rele
- c. Koordinasi dengan pemutus tenaga

Apabila terjadi pelepasan beban diharapkan tidak terjadi kelebihan beban yang dilepaskan karena hal ini mengakibatkan kerugian bagi pembangkit maupun pengguna. Oleh sebab itu, diperlukan beberapa tahapan pelepasan beban untuk menghindari hal tersebut. Tahap-tahap tersebut diatur pada rele frekuensi menurun. Tahapan frekuensi tersebut dapat diperkirakan dengan melalui beberapa perhitungan. Dalam menanggapi sinyal frekuensi rendah, rele membutuhkan waktu tunda untuk memastikan apakah penurunan tersebut disebabkan oleh beban lebih atau penyebab yang lain. Setelah dipastikan bahwa penurunan tersebut



disebabkan oleh beban lebih, rele juga membutuhkan waktu untuk beroperasi. Pada umumnya, masing-masing rele frekuensi memiliki karakteristik waktu operasi tertentu yang dipengaruhi oleh laju penurunan frekuensi. Sehingga untuk mendapatkan hasil yang optimal, pengaturan waktu tunda dapat disesuaikan dengan karakteristik rele.

Rele frekuensi berfungsi untuk memberikan sinyal kepada pemutus tenaga beban untuk membuka. Ketika pemutus tenaga bekerja maka jaringan beban yang terhubung dengannya lepas dari sistem. Oleh karena pemilihan beban yang akan dilepaskan berdasarkan prioritas nilai ekonomi dan keandalan sistem, beban yang akan dilepaskan terletak menyebar di seluruh sistem. Untuk mengatasi hal tersebut tentu perlu pertimbangan khusus untuk memilih letak pemasangan rele frekuensi.

2.6.1 Frekuensi Kerja Rele²

2.6.1.1 Penentuan Frekuensi Tahap Pertama

Mulai bekerjanya suatu rele frekuensi menurun adalah ketika frekuensi generator memasuki wilayah abnormal. Untuk mendapatkan keandalan yang tinggi dari sistem tersebut maka harus dipilih tingkat frekuensi tertinggi untuk rele trip. Nilai frekuensi tersebut tidak boleh terlalu jauh dengan batas bawah frekuensi nominal.

Pemilihan tingkat frekuensi pertama kali bekerja mutlak ditentukan oleh pengguna. Tentu saja pemilihan frekuensi tertinggi ini melalui pertimbangan-pertimbangan khusus seperti misalnya keamanan sistem yang diberikan, kapasitas generator serta kemampuan sistem untuk bertahan pada frekuensi tersebut.

Menurut beberapa survey yang dilakukan oleh Power System Relaying Committee (PSRC), salah satu dari 18 komite teknis IEEE Power Engineering Society (PES) yang bekerja untuk memberikan bimbingan atau penyuluhan berkaitan dengan teknologi proteksi pada sistem tenaga listrik,



didapatkan beberapa nilai frekuensi tertinggi untuk acuan bagi rele trip yang dipilih oleh beberapa perusahaan seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.2

Tabel 2.2 Rentang Tingkat Frekuensi Tertinggi Untuk Bekerja

Frekuensi (Hz)	Jumlah Perusahaan Menurut Kapasitas Generator (MW)			Total
	0 – 1000	1001 – 3000	3001 - 4000	
59,6 – 60	2	2	0	4
59,1 - 59,5	28	13	9	50
58,6 - 59.0	9	11	5	24
58,1 - 58,5	5	2	0	7
57,0 - 58,0	1	1	0	2

Dari tabel 2.2 didapatkan rentang frekuensi terendah yang diatur pada rele paling banyak digunakan adalah rentang frekuensi 59,1 – 59,5 Hz. Dengan melihat data tersebut, terlihat bahwa beberapa perusahaan yang menggunakan rele frekuensi menurun sangat memperhatikan tingkat kestabilan sistem. Pemilihan rentang frekuensi ini mengacu kepada standar frekuensi IEEE. Dimana pada frekuensi tersebut, generator masih diijinkan bekerja pada durasi waktu yang cukup lama.

Menurut Blackburn³, batas frekuensi kerja secara terus-menerus turbin 60 Hz bertekanan rendah dengan panjang sudu-sudu 18-25 Inc adalah 58,8-61,5 Hz. Sedangkan pada frekuensi 56–58,8 Hz mesin hanya boleh bekerja maksimum selama 10 menit untuk sepanjang umur turbin tersebut. Untuk turbin dengan panjang sudu-sudu 25-44 Inc range frekuensi kerja adalah 59,5–60,5 Hz secara terus-menerus, sedangkan waktu kumulatif sepanjang umur mesin yang diizinkan untuk bekerja pada batas-batas frekuensi 58,5 - 59,5 hanya 60 menit.

Waktu kumulatif bekerja pada frekuensi 56 – 58,5 Hz hanya boleh selama 10 menit. Untuk mengatasi masalah ini unit generator selalu

³ Bonar Panjaitan. 2012. Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik. Yogyakarta .Hal : 386-387



dilengkapi dengan rele *under* frekuensi yang diset tiga tahap, yaitu : (Bonar Panjaitan. 2012)

1. Trip *instantaneous* pada frekuensi 56 Hz
2. Trip dengan waktu terlambat maksimum selama 2 menit pada frekuensi 58,4 Hz ,
3. Selama 6 menit pada frekuensi 59,4 Hz.

2.6.1.2 Penentuan Frekuensi Tahap Kedua dan Seterusnya

Setelah frekuensi tertinggi untuk rele bekerja ditentukan, ketika terjadi beban lebih pada sistem dan frekuensi pun turun akibat ketidakmampuan untuk melayani kebutuhan beban maka ketika frekuensi memasuki daerah frekuensi trip akan terjadi pelepasan beban untuk pemulihan frekuensi. Beban yang dilepaskan ini diasumsikan telah ditentukan sebelumnya. Ada saat di mana jumlah beban yang dilepaskan belum cukup untuk memulihkan frekuensi sehingga frekuensi masih terus menurun. Oleh sebab itu diperlukan beberapa tingkatan frekuensi yang diatur pada rele frekuensi yang besarnya lebih rendah daripada frekuensi acuan pertama untuk melepaskan beban yang lebih besar lagi. Hal ini dilakukan untuk menghindari adanya kekurangan beban yang dilepas pada tahap pertama.

Penentuan frekuensi acuan tahap kedua dan seterusnya bergantung pada besarnya perkiraan laju penurunan frekuensi yang terjadi dan waktu operasi rele pada tahap sebelumnya. Laju penurunan frekuensi berdasarkan kelebihan beban yang terjadi. Langkah pertama untuk menentukan frekuensi acuan adalah menghitung besar laju penurunan frekuensi. Laju penurunan ini bergantung pada besarnya kelebihan beban yang terjadi, frekuensi nominal, rating MVA generator dalam keadaan ideal dan besar konstanta inersia.

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{P_S}{2GH} \right) \times f \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

P_S = Selisih permintaan beban dan daya yang disuplai generator



G = Rating MVA generator

H = Konstanta Inersia

f = Frekuensi nominal

2.6.2 Waktu Operasi Rele²

Keterlambatan waktu yang direncanakan untuk setiap tingkat pelepasan beban tidak boleh mengizinkan frekuensi sistem melampaui batas minimum frekuensi yang ditetapkan. Waktu kerja setiap tingkat pelepasan beban dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut :

$$t = t_R + t_{CB} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

t = waktu total

t_R = waktu rele

t_{CB} = waktu pemutus tenaga

Waktu rele (t), ditentukan berdasarkan jenis rele yang digunakan untuk rele yang bekerja atas dasar frekuensi biasanya ditentukan minimal 0,3 detik. Ini berkaitan dengan kemungkinan adanya penurunan frekuensi sistem secara tiba-tiba karena beban lebih, yang biasanya tidak lebih lama dari waktu tersebut. Sedang waktu pemutus tenaga (t_{CB}) biasanya diperhitungkan sebesar 0,1 detik. Sehingga untuk rele yang bekerja atas dasar frekuensi, maka waktu keseluruhan dari gangguan mulai dirasakan sampai beban dilepas adalah 0,4 detik.

Untuk rele yang bekerja atas dasar frekuensi dan laju penurunan frekuensi, waktu *pick up* ($t_{pick\ up}$) dipengaruhi langsung oleh kecepatan penurunan frekuensi. Harga dari $t_{pick\ up}$ ini dapat diperoleh dari karakteristik rele, dengan terlebih dahulu mengetahui besar laju perubahan frekuensi. Untuk rele frekuensi kurang *setting* $\frac{df}{dt}$



Penghitungan waktu ini digunakan untuk menentukan perkiraan frekuensi akhir dimana saat pelepasan beban dilakukan setelah frekuensi tertinggi untuk trip terdeteksi.

$$T_{pick-up} = \frac{f_0 - f_1}{\frac{df}{dt}} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$T_{trip} = T_{Pick-Up} - T_{CB} - T_{relay} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan $f_{load shedding}$ adalah frekuensi acuan pelepasan beban. Setelah laju penurunan frekuensi dan waktu trip tahap sebelumnya didapatkan, nilai frekuensi ketika terjadi pelepasan beban adalah :

$$f_{load shedding} = \left[f_0 - \frac{df}{dt} (T_{trip}) \right] \dots\dots\dots(2.8)$$

Kemudian untuk frekuensi trip tahap berikutnya harus bernilai sedikit lebih kecil daripada frekuensi saat pelepasan beban dari frekuensi trip tahap sebelumnya.

2.6.3 Koordinasi dengan Pemutus Tenaga²

Dalam proses pelepasan beban akibat penurunan frekuensi dibutuhkan suatu rele frekuensi menurun. Rele tersebut berfungsi untuk mengirimkan sinyal penurunan frekuensi ke pemutus tenaga yang terletak pada sisi beban. Untuk melakukan suatu pelepasan beban bergantung kepada tingkat prioritas beban yang ingin dilepaskan apabila terjadi gangguan.

Rele frekuensi ketika bekerja hanya akan mengirimkan sinyal penurunan frekuensi kepada pemutus tenaga yang menghubungkan beban paling rendah tingkat prioritasnya baik dipandang dari segi ekonomi, keandalan sistem maupun daya yang dibutuhkan.