

Pengaruh Penutupan-Balik Tak-Sinkron terhadap Generator Induksi 3-Fase dalam Skema Pembangkitan Tersebar

M. Isnaeni B.S.¹, F. Danang Wijaya², Eka Firmansyah³

Abstract—Small and medium-scale plants connected to the distribution line form a distributed generation (DG) system. Unsynchronized reclosing, due to the operation of a recloser, is an important issue in DG systems. In this paper, simulations of typical DG system are performed to show the effect of unsynchronized reclosing. The simulation results show that unsynchronized reclosing causes the generator to experience over speed, over and under voltage, and over current, which can damage or reduce the life of the generator. A permanent short circuit that causes the contact of recloser to open and close repeatedly has a worse effect than a temporary short circuit. Opening the circuit breaker at point of common coupling with the installation of dummy load can reduce the bad effect of unsynchronized reclosing.

Intisari—Pembangkit-pembangkit skala kecil dan menengah dioperasikan terhubung ke jaringan distribusi membentuk sistem pembangkitan tersebar (PT). Penutupan-balik tak-sinkron (PBTS) akibat bekerjanya pemutus balik otomatis (PBO) merupakan isu penting pada sistem PT. Pada makalah ini, simulasi tipikal sistem PT digunakan untuk memperlihatkan pengaruh PBTS. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa PBTS menyebabkan generator mengalami kecepatan lebih, tegangan kurang dan tegangan lebih, dan arus lebih, yang dapat merusak atau mengurangi umur generator. Gangguan hubung singkat permanen, yang menyebabkan operasi buka-tutup kontak PBO berulang-ulang, menimbulkan pengaruh lebih buruk dibanding gangguan sementara. Pembukaan *circuit breaker* di *point of common coupling* disertai pemasangan beban pengganti (*dummy load*) dapat mengurangi pengaruh buruk PBTS.

Kata Kunci— PBTS, PT, Generator induksi, PBO

I. PENDAHULUAN

Dewasa ini semakin banyak dibangun pembangkit-pembangkit listrik skala kecil dan menengah yang memanfaatkan energi terbarukan, di antaranya pembangkit minihidro dan mikrohidro. Generator induksi lazim digunakan pada pembangkit-pembangkit tersebut [1]--[3]. Pembangkit-pembangkit tersebut dioperasikan terhubung ke saluran distribusi dan membentuk sistem pembangkitan tersebar (PT). Salah satu isu penting pada sistem PT adalah penutupan-balik

tak-sinkron (PBTS) yang disebabkan operasi penutup balik otomatis (PBO) di jaringan. Meskipun penyambungan generator induksi ke jaringan distribusi tidak memerlukan proses sinkronisasi, tetapi PBTS tetap menimbulkan banyak persoalan. Pada proses koneksi generator induksi ke jaringan, terminal generator belum bertegangan dan penggerak mula belum memberikan daya ke beban, sehingga tidak memerlukan proses sinkronisasi. Sedangkan pada kejadian PBTS, tegangan terminal generator sudah bertegangan dan penggerak mula dalam kondisi memberi daya ke generator. Beberapa peneliti telah mengkaji unjuk kerja dan karakteristik generator induksi yang terhubung ke saluran distribusi, baik kajian melalui simulasi maupun eksperimen. Pengaruh buruk arus transien menuju generator saat proses koneksi dapat dikurangi dengan pemasangan konverter elektronik yang bekerja sebagai kompensator daya [4]. Peningkatan faktor daya dan efisiensi dapat dilakukan dengan mengatur tegangan terminal generator [5]. Daya reaktif yang diperlukan generator pada umumnya dicatu dari kapasitor yang dipasang di terminal generator. Nilai kapasitor yang tepat dapat memperbaiki faktor daya dan efisiensi generator [6]. Keadaan transien pada sistem tenaga listrik yang tersusun dari satu generator induksi dan dua generator sinkron juga telah disimulasikan [7]. Hasil simulasi tersebut memperlihatkan adanya pengaruh buruk generator induksi terhadap generator sinkron karena sifat generator induksi yang memerlukan daya reaktif. Titik operasi optimum diperoleh dengan memperhitungkan perbandingan daya reaktif dan daya nyata, baik pada keadaan stand-alone maupun connected to grid [8]. Pada penelitian-penelitian tersebut tidak dibahas keadaan saat terjadi putus-sambung generator ke grid [4]--[8]. Makalah ini mendiskusikan karakteristik tegangan, arus, dan daya di terminal generator induksi berkaitan dengan PBTS karena operasi PBO. Karakteristik tersebut perlu diketahui sebagai dasar desain sistem proteksi generator induksi yang terhubung ke saluran distribusi.

PBO atau *recloser* adalah peranti swa-kendali (*self-controlled*) untuk membuka dan menutup rangkaian listrik arus bolak-balik secara otomatis, yang urutan buka-tutupnya telah ditentukan sebelumnya [9]. PBO banyak dipasang di saluran distribusi tegangan menengah. PBO mempunyai beberapa karakteristik arus-waktu sehingga lebih mudah dikoordinasikan dengan peranti proteksi lainnya. Apabila terjadi gangguan hubung singkat, PBO akan membuka kontaktor. Setelah beberapa saat yang singkat (disebut sebagai *dead time*), kontaktor akan menutup kembali. Apabila gangguan bersifat sementara, maka kontaktor akan terus menutup sehingga saluran distribusi kembali dalam kondisi

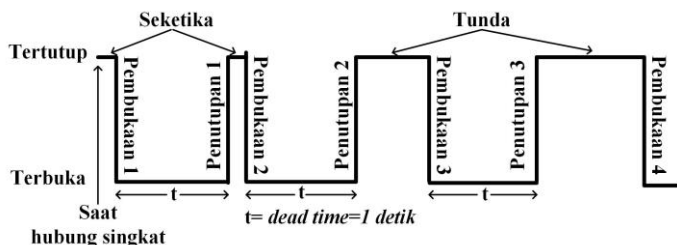
¹Mahasiswa S3, Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika 2 Yogyakarta, INDONESIA (telp: 0274-552305; fax: 0274-547506; e-mail: isnaeni@ugm.ac.id)

^{2,3}Dosen, Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika 2 Yogyakarta, INDONESIA (telp: 0274-552305; fax: 0274-547506; e-mail: danangwijaya@ugm.ac.id)

normal. Apabila gangguan belum hilang, maka kontaktor akan membuka kembali. Cacah urutan buka-tutup dapat diatur. Pembukaan kontaktor maupun *dead time* dapat bersifat seketika (*instantaneous*) atau dengan tunda waktu.

Pada Gbr. 1 diperlihatkan siklus waktu operasi PBO yang lazim digunakan pada saluran distribusi [10], [11]. PBO dioperasikan dengan ragam 2 cepat (seketika) dan 2 tunda. Sesaat setelah terjadi hubung singkat, kontak akan membuka seketika (pembukaan 1). Waktu pembukaan seketika adalah 0,1 detik. Kontak menutup kembali (penutupan 1) setelah 1 detik (*dead time*). Apabila gangguan sudah hilang, maka kontak akan terus menutup. Apabila gangguan masih ada, maka kontak akan kembali membuka seketika (pembukaan 2). Kontak menutup kembali setelah 1 detik (penutupan 2). Apabila gangguan sudah hilang, maka kontak akan terus menutup. Apabila gangguan masih ada, maka kontak akan kembali membuka dengan tunda waktu (pembukaan 3). Besar tunda waktu tergantung pada besar arus gangguan, kurva arus waktu PBO, dan koordinasi dengan peranti proteksi lainnya. Kontak menutup kembali setelah 1 detik dan penutupan ini adalah penutupan terakhir (penutupan 3). Apabila gangguan sudah hilang, maka kontak akan terus menutup. Apabila gangguan masih ada, yang berarti gangguan permanen, maka kontak akan kembali membuka dengan tunda waktu (pembukaan 4), dan kontak akan terus membuka.

Pada saat kontak PBO membuka, koneksi pembangkit ke trafo daya di gardu induk (GI) atau *grid* terputus, meskipun pembangkit masih terhubung ke saluran distribusi. Kondisi tersebut dinamakan *loss of main* (LoM) atau *loss of grid* (LoG). Standar IEEE 1547 2003 mensyaratkan pemutusan koneksi pembangkit ke saluran distribusi paling lama 2 detik setelah terjadinya LoM [12].



Gbr. 1 Siklus waktu operasi PBO.

II. SISTEM PEMBANGKITAN TERSEBAR

Sistem PT yang disimulasikan adalah sistem PT tipikal yang tersusun dari pembangkit skala kecil, saluran distribusi tegangan rendah 380 V, saluran distribusi tegangan menengah 20 kV, dan GI, seperti diperlihatkan pada Gbr. 2. Pembangkit skala kecil merepresentasikan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMh) yang menggunakan generator induksi 3 fase 25 kW. Pengaturan daya mekanik dilakukan secara manual, tidak menggunakan *governor*, atau lazim disebut *unregulated*. Generator terhubung ke ujung saluran distribusi tegangan rendah melalui *point of common coupling* (PCC). Kapasitor eksitasi 69 kVAR berupa *fix capacitor*.

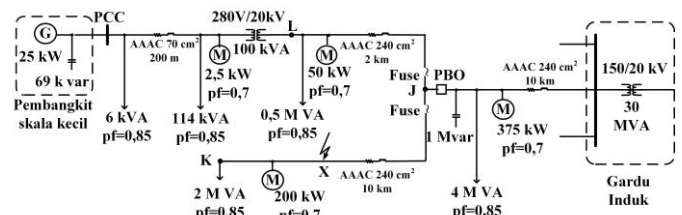
Saluran distribusi tegangan rendah 3 fase berupa *overhead line* menggunakan kawat AAAC 70 mm² dengan panjang 200

m. Saluran tegangan menengah 3 fase berupa *over head line* menggunakan kawat AAAC 240 mm². Terdapat tiga penggal saluran, yaitu dari GI ke titik J sepanjang 10 km, dari titik J ke titik L sepanjang 10 km, dan dari titik J ke L sepanjang 2 km.

Beban terpasang pada masing-masing penggal saluran dikumpulkan di pangkal dan ujung saluran. Beban terpasang pada tegangan rendah adalah 120 kVA dengan pf 0,85 yang merupakan beban pasif, dan beban aktif berupa motor induksi sebesar 2,5 kW pada pf = 0,7 (2,5% beban total). Beban tegangan rendah sebagian kecil dicatu dari pembangkit, dan sebagian besar lainnya dicatu dari saluran tegangan menengah melalui trafo distribusi 100 kVA. Beban pasif tegangan menengah sebesar 6,5 MVA dengan pf = 0,85, dan beban aktif berupa motor induksi 625 kW dengan pf = 0,7 (11% beban total). Terdapat kapasitor 1 MVAR di saluran tegangan menengah yang digunakan untuk perbaikan faktor daya.

Kapasitas trafo daya di GI adalah 30 MVA. Kapasitas hubung singkat di sekunder trafo daya adalah lima kali daya trafo, yaitu 150 MVA, sehingga jaringan transmisi dan trafo daya dapat diwakili oleh *grid* berkapasitas hubung singkat sebesar 150 MVA.

Sistem proteksi saluran distribusi menggunakan PBO dan *fuse*. PBO dipasang di sisi hulu titik J, sedangkan *fuse* dipasang di sisi hilir titik J pada masing-masing penggal. PBO dan *fuse* dikoordinasikan untuk mengantisipasi gangguan di penggal JK dan penggal JL. Gangguan hubung singkat sementara akan diatasi oleh PBO, sedangkan gangguan permanen akan diatasi oleh *fuse* di masing-masing penggal.



Gbr. 2 Sistem PT tipikal.

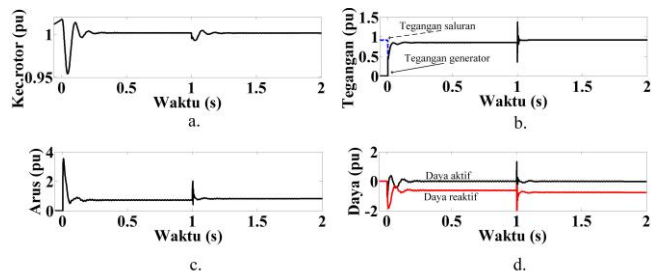
III. HASIL SIMULASI

Sistem PT tipikal pada Gbr. 2 disimulasikan menggunakan SIMULINK-MATLAB, meliputi: (a) proses *start-up* generator, (b) proses PBTS akibat operasi PBO menanggapi gangguan hubung singkat 3-fase sementara, dan (c) proses PBTS akibat operasi PBO menanggapi gangguan hubung singkat 3-fase permanen.

A. Start-up Generator Induksi Koneksi ke Saluran Distribusi

Proses koneksi generator induksi ke saluran distribusi tidak memerlukan proses sinkronisasi. Koneksi terminal generator dilakukan setelah putaran rotor generator sudah mencapai sedikit di atas kecepatan sinkron (1.500 rpm). Meskipun rotor sudah berputar, tetapi terminal generator belum bertegangan karena kapasitor eksitasi belum terhubung ke terminal generator. Pada Gbr. 3, koneksi dilakukan pada $t = 0$ detik, saat kecepatan rotor sekitar 1,02 pu (1.530 rpm). Kecepatan rotor beresilasi selama 0,25 detik menuju ke kecepatan keadaan mantap (*steady state*), 1,002 pu (1.503 rpm).

Tegangan generator naik dari 0 V menuju nilai keadaan mantap 0,85 pu (185 V) dalam waktu 100 milidetik (5 siklus), sedangkan tegangan saluran turun dengan cepat dan kemudian naik seiring dengan kenaikan tegangan generator. Kapasitor eksitasi dihubungkan 1 detik setelah terminal generator terhubung ke saluran distribusi. Kecepatan rotor beresilasi saat kapasitor eksitasi dihubungkan ke terminal generator pada $t = 1$ detik. Amplitude osilasi lebih kecil dan waktu osilasi lebih cepat. Terjadi lonjakan tegangan sangat singkat (*impulse*) dengan durasi 5 milidetik (seperempat siklus) saat kapasitor terkoneksi.



Gbr. 3 Kecepatan rotor, tegangan, arus, dan daya generator saat proses *start-up*.

Arus *start-up* mencapai 3,5 pu (400 A) dan mencapai nilai keadaan mantap 0,8 pu (95 A). Arus 0,8 pu tersebut adalah arus eksitasi yang bersifat kapasitif. Arus tersebut lebih kecil dibanding tipikal arus asut motor induksi yang bernilai sampai dengan 7 pu.

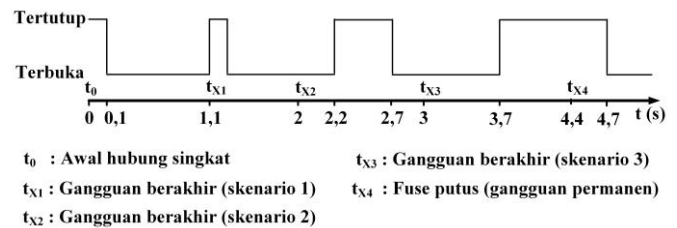
Daya aktif dan daya reaktif beresilasi selama 200 milidetik. Amplitude osilasi daya aktif adalah 0,4 pu dan menuju nilai keadaan mantap sekitar 0 pu (*floating*). Pada kondisi *floating*, generator tidak mengirim daya (*generating*) maupun menyerap daya (*motoring*). Adanya arus eksitasi di belitan stator menyebabkan munculnya medan magnet di rotor dan stator. Interaksi antara medan magnet di rotor dan stator menimbulkan torsi listrik yang melawan torsi penggerak mula. Osilasi daya aktif akan menuju titik keseimbangan antara torsi penggerak mula (berkaitan dengan daya aktif keluaran penggerak mula), torsi listrik (berkaitan dengan daya aktif masukan dari jaringan), dan kecepatan rotor. Osilasi daya aktif lebih dominan dipengaruhi oleh perubahan torsi listrik yang berkaitan dengan perubahan arus eksitasi, sehingga kecepatan rotor tidak terlalu beresilasi. Untuk meminimalkan amplitude dan durasi osilasi daya aktif, koneksi terminal generator ke saluran dilakukan saat rotor berputar pada kecepatan sinkron. Amplitude osilasi daya reaktif mencapai 1,8 pu dan mencapai nilai keadaan mantap 0,6 pu. Osilasi daya reaktif berkaitan dengan keseimbangan torsi dan besarnya arus eksitasi yang diperlukan untuk membangkitkan tegangan. Oleh karena tegangan jaringan relatif konstan, maka osilasi daya reaktif lebih dominan dipengaruhi oleh keseimbangan torsi.

B. Penutupan-balik Tak-sinkron karena Gangguan Sementara

Gangguan hubung singkat 3-fase terjadi di titik X pada penggal JK (Gbr. 2). Simulasi dilakukan pada tiga skenario,

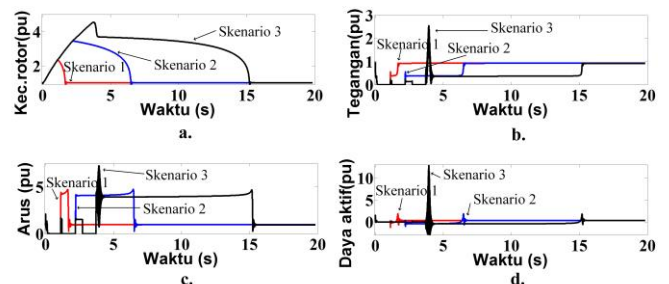
1. gangguan sementara 1 detik,
2. gangguan sementara 2 detik, dan
3. gangguan sementara 3 detik.

Gangguan hubung singkat 3-fase terjadi pada $t = 0$ detik. Oleh karena gangguan bersifat sementara, maka *fuse* belum menanggapi gangguan. Pada skenario 1, PBTS terjadi pada penutupan 1 kontak PBO pada $t = 1,1$ detik. Pada skenario 2, PBTS terjadi pada penutupan 2 kontak PBO pada $t = 2,2$ detik. Pada skenario 3, PBTS terjadi pada penutupan 3 kontak PBO pada $t = 3,7$ detik. Pada skenario 3, penutupan 1 dan penutupan 2 bukan merupakan PBTS karena gangguan hubung singkat belum berakhir. Urutan kejadian masing-masing skenario diperlihatkan pada Gbr. 4.



Gbr. 4 Operasi PBO karena gangguan hubung singkat.

Sesaat setelah terjadi hubung singkat di titik X, kontak PBO membuka. Generator mengalami pembebanan sangat berlebih sehingga tidak ada lagi interaksi antara torsi mekanik dan torsi listrik, atau generator mengalami lepas-sinkron. Putaran rotor naik dikarenakan torsi mekanik konstan dan tidak adanya torsi listrik, sedangkan tegangan, arus, dan daya turun dengan cepat menuju nol, seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 5.



Gbr. 5 Kecepatan rotor, tegangan, arus, dan daya generator akibat gangguan hubung singkat sementara.

Pada $t = 1,1$ detik, satu detik (*dead time*) setelah kontak PBO membuka, kontak akan menutup kembali. Pada skenario 1, hubung singkat berakhir pada $t = 1$ detik, sehingga penutupan 1 merupakan PBTS. Kecepatan rotor pada $t = 1,1$ detik mencapai 2,1 pu (3.150 rpm), sudah melebihi kemampuan tipikal kecepatan lebih mesin induksi, yaitu 2 pu. Kecepatan rotor segera turun dari 2 pu menuju ke 1 pu (kecepatan sinkron) seperti pada Gbr. 5a. Tegangan naik menuju nilai keadaan mantap (Gbr. 5b). Arus dan daya beresilasi selama 0,2 detik dan menuju nilai keadaan mantap (Gbr. 5c dan Gbr. 5d). Karakteristik tegangan, arus, dan daya mirip seperti karakteristik *start-up*, tetapi mempunyai amplitude yang lebih besar. Pada skenario 2 dan 3, penutupan 1 merupakan PBTS pada kondisi hubung singkat masih berlangsung.

Pada $t = 2,2$ detik, kontak PBO menutup kembali (penutupan 2). Pada skenario 2, hubung singkat berakhir pada $t = 2$ detik, sehingga penutupan 2 merupakan PBTS. Kecepatan rotor pada $t = 2,2$ detik mencapai 3,5 pu (5.250 rpm). Kecepatan rotor turun menuju ke 1 pu dalam waktu 4 detik (Gambar 5a). Dalam waktu 4 detik tersebut, tegangan bernilai 0,5 pu dan arus bernilai 4 pu (Gbr. 5b dan Gbr. 5c). Kondisi tegangan kurang (*under voltage*) dan arus lebih (*over current*) dalam waktu 4 detik dapat menyebabkan mesin mengalami pemanasan lebih (*over heated*). Daya beresilasi sangat singkat dan menuju ke nilai semula, yaitu 1 pu (Gbr. 5d). Pada skenario 3, penutupan 2 merupakan PBTS pada kondisi hubung singkat masih berlangsung.

Pada $t = 3,7$ detik kontak PBO menutup kembali (penutupan 3). Pada skenario 3, hubung singkat berakhir pada $t = 3$ detik, sehingga penutupan 3 merupakan PBTS. Kecepatan rotor pada $t = 3,7$ detik mencapai 4,5 pu (6.750 rpm). Kecepatan rotor turun menuju ke 1 pu dalam waktu 12 detik (Gbr. 5a). Tegangan beresilasi singkat dengan magnitude 2,5 pu turun ke nilai 0,25 pu. Selama 12 detik tegangan bernilai 0,25 pu dan arus bernilai 4 pu (Gbr. 5b dan Gbr. 5c). Kondisi tegangan kurang dan arus lebih dalam waktu 12 detik dapat menyebabkan mesin mengalami pemanasan lebih. Daya beresilasi sangat singkat dengan magnitude mencapai 15 pu dan menuju ke nilai semula, yaitu 1 pu (Gbr. 5d). Meskipun magnitude osilasi daya mencapai 15 pu, tetapi karena berlangsung sangat singkat, maka tidak menimbulkan osilasi kecepatan rotor. Osilasi tersebut terjadi karena osilasi torsi listrik pada proses penyeimbangan menuju keadaan mantap.

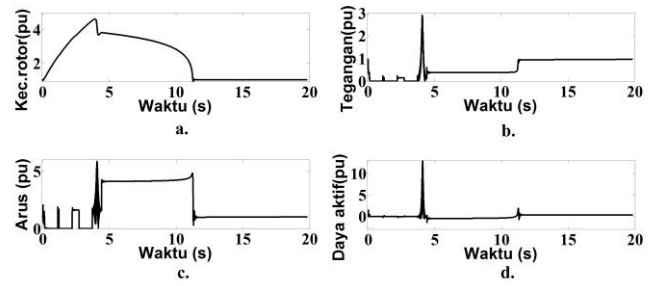
C. Penutupan-balik Tak-sinkron karena Gangguan Permanen

Gangguan permanen akan ditanggapi oleh PBO dan fuse. Kontak PBO membuka dan menutup sampai tunda waktu terakhir. Fuse putus pada $t = 4,4$ detik, sebelum pembukaan terakhir PBO ($t = 4,7$ detik), seperti diperlihatkan pada Gbr. 4. PBTS terjadi saat penutupan 3 kontak PBO pada $t = 3,7$ detik, dalam keadan masih ada hubung singkat di titik X. Kecepatan rotor turun saat terjadi PBTS akibat munculnya torsi listrik yang besar selama osilasi 0,3 detik. Oleh karena masih ada hubung singkat di titik X, tegangan di terminal generator bernilai rendah, 0,2 pu, arus bernilai besar, 1,5 pu, selama fuse saluran penggal JK belum putus, seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 6. Setelah fuse penggal JK putus pada $t = 4$ detik, maka saluran penggal JM dan saluran tegangan rendah tidak lagi terpengaruh oleh hubung singkat di titik X, sehingga tegangan naik dengan cepat ke nilai 0,5 pu dan arus naik ke nilai 4,5 pu. Tegangan dan arus tersebut bertahan selama 8 detik sampai kecepatan rotor turun ke nilai 1 pu pada $t = 11$ detik. Keadaan tersebut dapat menyebabkan generator mengalami pemanasan lebih. Setelah kecepatan rotor bernilai 1 pu maka tegangan naik ke nilai keadaan mantap 1 pu dan arus turun ke nilai keadaan mantap 1 pu.

IV. DISKUSI

Operasi penutupan kembali PBO merupakan PBTS yang menimbulkan masalah pada generator, yaitu kecepatan lebih (*over speed*), tegangan kurang dan tegangan lebih (*under and*

over voltage), arus lebih, dan osilasi daya. Gangguan hubung singkat permanen menyebabkan terjadinya PBTS berulang dan menimbulkan efek yang paling membahayakan bagi generator (kecepatan lebih dan arus lebih dalam durasi sampai 8 detik).



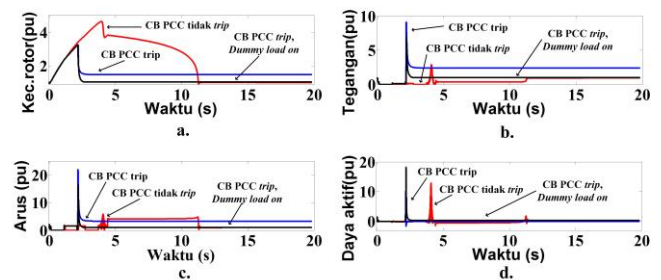
Gbr. 6 Kecepatan rotor, tegangan, arus, dan daya generator akibat gangguan hubung singkat permanen.

Sesaat setelah terjadi gangguan hubung singkat, kontak PBO akan membuka (pembukaan 1) dan pembangkit mengalami LoM. Sesuai Standar IEEE 1547, koneksi pembangkit ke saluran distribusi harus diputus dengan cara membuka CB di PCC paling lama 2 detik sejak terjadi LoM. Jika gangguan hubung singkat terjadi pada $t = 0$ detik dan kontak PBO membuka pada $t = 0,1$ detik, maka CB PCC harus dibuka paling lambat pada $t = 2,1$ detik (Gbr. 7).



Gbr. 7 Penentuan waktu pembukaan CB PCC sesuai Standar IEEE 1457.

Pembukaan CB PCC menyebabkan generator beroperasi secara terpisah (*islanding*) dari sistem PT. Oleh karena generator terputus dari beban di saluran distribusi, sedangkan daya masukan dari turbin masih tetap seperti semula, maka pembukaan CB PCC perlu diikuti dengan penambahan *dummy load* agar tidak terjadi kecepatan lebih dan tegangan lebih.



Gbr. 8 Pengaruh pembukaan CB PCC dan *dummy load*.

Pada Gbr. 8 diperlihatkan perbandingan tanggapan generator karena gangguan hubung singkat permanen untuk 3 keadaan: (a) tanpa pembukaan CB PCC, (b) pembukaan CB

PCC pada 2 detik setelah LoM tanpa adanya *dummy load*, dan (c) pembukaan CB PCC pada 2 detik setelah LoM dan ada penambahan *dummy load*. Terlihat bahwa apabila tidak dilakukan pembukaan CB PCC, maka gangguan hubung singkat permanen menyebabkan kecepatan lebih dan arus lebih sampai 8 detik, yaitu saat *fuse* di saluran tegangan menengah putus. Pembukaan CB PCC pada 2 detik setelah LoM dapat mengurangi kecepatan lebih tetapi menyebabkan tegangan lebih dan arus lebih. Pembukaan CB PCC dan diikuti penambahan *dummy load* mampu mengurangi kecepatan lebih, tegangan lebih, dan arus lebih.

Pada Gbr. 5, Gbr. 6, dan Gbr. 8 terlihat bahwa operasi pembukaan 1 kontak PBO menyebabkan tegangan dan arus turun dengan cepat sampai ke nilai nol. Kondisi nilai nol tersebut berlangsung selama *dead time* PBO (1 detik). Pembukaan 1 kontak PBO menyebabkan generator mengalami LoM. Oleh karena itu, tegangan dan arus yang bernilai nol selama masa *dead time* dapat digunakan untuk mendeteksi keadaan LoM. *Relay* tegangan dan *relay* arus dapat digunakan untuk mendeteksi keadaan LoM dan kemudian memerintahkan CB PCC untuk membuka dan menutup CB *dummy load*.

V. KESIMPULAN

PBTS yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat dan operasi PBO menimbulkan kecepatan lebih, tegangan kurang dan tegangan lebih, serta arus lebih yang dapat menyebabkan kerusakan generator atau mengurangi umur generator. Gangguan hubung singkat permanen menimbulkan pengaruh yang lebih buruk dibanding gangguan sementara karena menyebabkan PBTS yang berulang-ulang.

Pembukaan CB PCC pada 2 detik setelah LoM dan penambahan *dummy load* dapat mencegah terjadinya PBTS yang berulang. *Relay* tegangan dan *relay* arus dapat digunakan untuk mendeteksi pembukaan 1 kontak PBO atau LoM, untuk mencegah terjadinya PBTS berulang.

REFERENSI

- [1] C. P. Ion, C. Marinescu, "Autonomous Micro-grid based on Micro hydro Power Plants", *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)* 13th, 24-26 May 2012, Brasov, pp. 941 – 946.
- [2] Sumedha Rajakaruna and Naing Naing Maw, "Unregulated Performance of an Induction Generator in an Isolated Micro Hydro Power Plant", *International Power Engineering Conference, IPEC 2005*. Nov. 29 -Dec. 2 2005, Singapore.
- [3] Duyar, A, Artesis Turkey, Gebze, Kuzkaya, C, Duyar, K., Magureanu, R., "Monitoring and Diagnosis for Induction Microhydro Electric Generators", *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED.*, 6-8 Sept. 2007, Cracow, pp 399 – 404.
- [4] Gorwski, D.A., Wiśniewski, J, Koczara, K., "Grid connection transients of small hydropower generator", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'12)* Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012.
- [5] Bakhsh, F.I., Islam, S., Ahmad, S., "Simulation for Performance Analysis of Grid-Connected Induction Generators with Input Voltage Control", *Third International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies (ACCT)*, 2013.
- [6] Filho, A.F.F., Nascimento, C.S.C., "A method to determine the capacitance required by the operation of a grid-connected induction generator", *International Conference on Electrical Machines (ICEM) XIX*, 2010.
- [7] Pal, M., Sandhu, K.S., "Behavior of grid connected induction generator due to load disturbances across power network", *Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, 2014.
- [8] Farrag, M. E. A., Putrus, G. A., "Analysis of the Dynamic Performance of Self-Excited Induction Generators Employed in Renewable Energy Generation" www.mdpi.com/journal/energies, ISSN 1996-1073, *Energies* 2014, 7, 278-294, doi:10.3390/en7010278, 2014
- [9] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Std C37.100-1992S, IEEE Standard Definitions for Power Switchgear", Edition 2.0, 2012.
- [10] Anderson, P. M., "Power System Protection", The IEEE, Inc. New York, 1999, hal. 224.
- [11] Rao, S., "EHAV-AC, HVDC Transmission and Distribution Engineering", Edisi k3-3, Khanna Publisher, Delhi, 1999, hal. 1269.
- [12] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Std 1547 2003 IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric power Systems".