

# Analisis *Voltage Sag* pada Sistem Tenaga Listrik PT. Petrochina International Ltd. Sorong

Chandra WIHARYA, Hadi SUYONO dan Rini Nur HASANAH

**Abstrak**— Petrochina adalah salah satu perusahaan tambang minyak yang menggunakan hampir 94% pasokan listriknya digunakan untuk beban motor ESP (Electrical submersible pump) yang bersifat induktif. Permasalahan ketidakstabilan tegangan terjadi ketika starting maka beberapa motor akan kembali padam karena pengaman under dan over voltage kembali bekerja karena seting tegangan sekitar  $\pm 10\%$  dari tegangan nominal ketika terjadi transien tegangan. Pada PT. Petrochina International Ltd terdapat dua sistem pembangkit, yaitu Walio dan Kasim Marine Terminal (KMT). Kedua sistem tersebut masing-masing bekerja sendiri dalam menyuplai beban yang sebagian besar berupa beban motor ESP (*Electrical Submersible Pump*). Untuk itu dalam artikel ini dianalisis solusi interkoneksi dua sistem yang ada serta pemasangan peralatan FACTS untuk mengatasi *voltage sag*. Analisis dilakukan menggunakan alat bantu software PSCAD untuk simulasi gangguan hubung singkat atau *starting* motor pompa *submersible* agar dapat diketahui besarnya *voltage sag* di setiap bus. Dari hasil analisis diketahui bahwa jika terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, maka bus yang paling rawan mengalami *voltage sag* adalah bus Echo. *Voltage sag* yang terjadi di bus Echo besarnya 8% pada saat pengasutan 12 unit ESP, sedangkan gangguan 1-fasa ke tanah menyebabkan *voltage sag* sebesar 26%. Dianalisis juga cara untuk mengatasi *voltage sag* akibat hubung singkat 1-fasa ke tanah maupun akibat pengasutan motor menggunakan interkoneksi kedua sistem yang ada serta pemasangan D-Statcom sebagai kompensasi daya reaktif. Hasilnya menunjukkan kenaikan tegangan ketika menggunakan interkoneksi sebesar 25%, sedangkan ketika menggunakan D-Statcom menjadi sebesar 28%. Disimpulkan bahwa pemasangan D-Statcom pada bus Echo lebih efektif dalam mengatasi *voltage sag* dari pada metode interkoneksi antara Walio dan KMT.

**Kata Kunci**—*Voltage Sag*, D-Statcom, FACTS, PSCAD, *Robustness*.

## I. PENDAHULUAN

**K**EBUTUHAN energi listrik untuk perumahan, komersial dan industri terus meningkat pada setiap tahunnya. Suplai daya dari sumber ke beban tersebut harus dikirim dengan suatu kontinuitas pelayanan dan kualitas yang baik. Kontinuitas suplai daya dapat

Chandra Wiharya adalah mahasiswa Program Magister Teknik Elektro peminatan Sistem Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang. Email: [arya\\_bro2000@yahoo.com](mailto:arya_bro2000@yahoo.com)

Hadi Suyono ([hadis@ub.ac.id](mailto:hadis@ub.ac.id)) dan Rini Nur Hasanah ([rini.hasanah@ub.ac.id](mailto:rini.hasanah@ub.ac.id)) adalah Dosen Program Magister Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

ditunjukkan dengan minimnya jumlah gangguan dan durasi pemadaman. Kualitas ditentukan oleh parameter listrik seperti tegangan dan frekuensi sistem tenaga listrik, yang harus berada dalam rentang standar operasi yang diperbolehkan. Salah satu permasalahan sistem tenaga listrik berhubungan dengan kualitas adalah *voltage sag*. Sekitar 80% masalah kualitas daya berhubungan dengan gejala *voltage sag* [1].

Menurut standar IEEE 1159-1995, *voltage sag* adalah tegangan drop sementara antara 10% sampai 90% dari tegangan efektif pada frekuensi daya selama setengah siklus sampai satu menit. Ada beberapa penyebab terjadinya *voltage sag* pada sistem tenaga listrik seperti hubung pendek, *start-up* dari motor-motor induksi besar, dan perubahan beban tiba-tiba.

Berdasarkan standar IEEE Std 141-1993, *voltage sag* yang mencapai 0,25–0,5% akan menyebabkan terjadinya kedip pada lampu penerangan. Arus pengasutan pada motor dan arus gangguan hubung singkat pada jaringan terdekat akan menyebabkan terjadinya kedip pada lampu, dan jika arusnya semakin besar akan mengakibatkan *voltage sag* yang dapat merusak peralatan yang sensitif. Motor listrik membutuhkan arus yang besar pada saat *pengasutan* dengan faktor daya yang rendah untuk waktu yang singkat. Besarnya arus *pengasutan* pada motor bisa mencapai lima kali dari arus beban penuh [2]. Pengasutan motor dan arus hubung pendek dapat juga menyebabkan gangguan pada peralatan utilitas seperti peralatan *Programmable Logic Control* (PLC) maupun peralatan lainnya [3].

PT. Petrochina International Ltd, Sorong Papua yang menjadi objek dalam penelitian ini merupakan salah satu perusahaan tambang minyak di Indonesia yang sebagian besar bebannya berupa motor pompa *submersible* yang digunakan untuk memompa minyak dari dasar bumi. banyak menggunakan motor dan sering mengalami tegangan jatuh pada saat operasi. PT. Petrochina International Ltd. mempunyai 2 pembangkit sendiri yang bersifat *islanding operation*, yaitu Walio dengan kapasitas 10x2,5 MW dan Kasim Marine Terminal (KMT) berkapasitas 4x2,5 MW dengan penggerak mula turbin gas alam yang diparalel. Untuk memenuhi ketentuan pasokan motor pompa ESP (*Electric Submersible Pumps*) sebanyak kurang lebih 232 motor, level tegangan pada masing-masing sumur diturunkan menjadi 2.3/1.919/1.15/1 kV (tergantung pada tegangan nominal motor ESP) melalui trafo *step-down*.

Permasalahan muncul ketika 9 generator harus dioperasikan, sementara besar beban mencapai 94% dari total kapasitasnya. Ketidakstabilan tegangan sering timbul terutama saat terjadi hubung singkat atau sambaran petir, sehingga pada salah satu zona akan terjadi transien tegangan yang dapat menyebabkan beberapa motor ESP harus OFF, mengingat bahwa setiap motor dilengkapi pengaman *under-* dan *over-voltage* serta *under-* dan *over-current*. Untuk mengaktifkan kembali maka diperlukan starting motor secara bersamaan.

Karena sebagian besar beban di PT. Petrochina International adalah pompa *submersible*, *voltage sag* akan terjadi jika motor-motor besar melakukan proses pengasutan. Adanya arus *start* besar yang secara tiba-tiba ditarik dari sistem tenaga listrik dapat menyebabkan terjadinya *voltage sag*.

Untuk mengatasi persoalan *voltage sag* yang mungkin terjadi pada sistem KMT dan Walio pada saat terjadi gangguan hubung pendek atau pun pengasutan motor diperlukan adanya sharing daya aktif dan daya reaktif untuk menambah kapasitas pembangkitan. Untuk itu dapat dilakukan dengan interkoneksi antara sistem pembangkit listrik Walio dan KMT di PT. Petrochina International Ltd. Sistem interkoneksi juga dapat meningkatkan ketangguhan (*robustness*) sistem terutama pada saat terjadi gangguan [4].

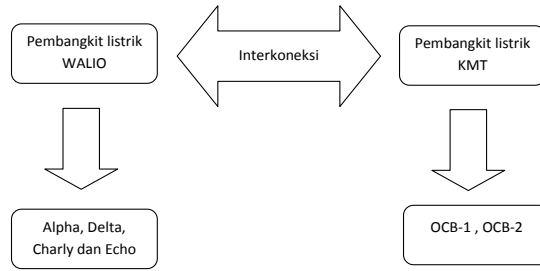
Disamping melalui interkoneksi, ketersediaan daya reaktif juga bisa dihasilkan dari penggunaan peralatan kompensator seperti peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS). FACTS dapat didefinisikan sebagai suatu sistem listrik berbasis elektronik dan peralatan statis lainnya yang memberikan kontrol dari satu atau lebih parameter sistem transmisi AC untuk meningkatkan pengendalian dan meningkatkan kemampuan transfer daya [5-6].

II. METODE ANALISIS VOLTAGE SAG

Kontrol pada sistem transmisi dapat dilakukan dengan menggunakan kontrol penggerak mula (*Prime mover*) dan eksitasi generator, pensaklaran bank kapasitor, reaktor shunt dan sistem VAR statis, kontrol pengubah tap dan regulasi trafo, serta teknologi kompensasi berbasis FACTS. Dua metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah kompensasi dengan penambahan kapasitas daya dengan interkoneksi dan D-Statcom

Metode pertama dilakukan dengan mengintegrasikan kedua sistem pembangkit, yaitu sistem pembangkit Walio dengan sistem pembangkit KMT, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

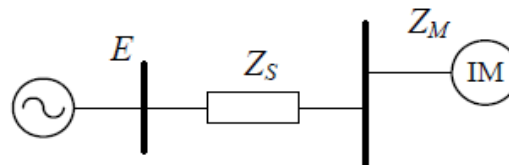
Metode kedua adalah dengan menggunakan kompensator berupa D-Statcom untuk injeksi daya reaktif ke sistem. D-Statcom berfungsi untuk menekan variasi tegangan dan mengatur injeksi daya reaktif pada sistem. D-Statcom adalah Voltage-Source Inverter (VSI), yang mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC untuk mengkompensasi daya aktif dan reaktif yang diperlukan oleh sistem.



Gambar 1. Blok diagram interkoneksi sistem Walio dengan sistem KMT

Salah satu penyebab *voltage sag* adalah start-up motor induksi berkapasitas besar. Arus pengasutan selama proses start-up motor induksi dapat mencapai 5 sampai 6 kali arus nominal pada operasi normal. Untuk menjelaskan fenomena startup, diagram skematik motor induksi selama start-up diilustrasikan pada Gambar 2. Vsag adalah tegangan lendut (volt), E adalah tegangan sumber (volt), ZS adalah impedansi sumber dan ZM adalah impedansi motor selama periode startup.

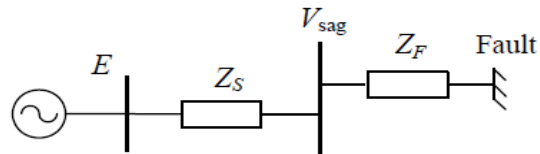
$$Vsag = \frac{Z_m}{Z_s + Z_m} E \tag{1}$$



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen untuk analisis *voltage sag* [7].

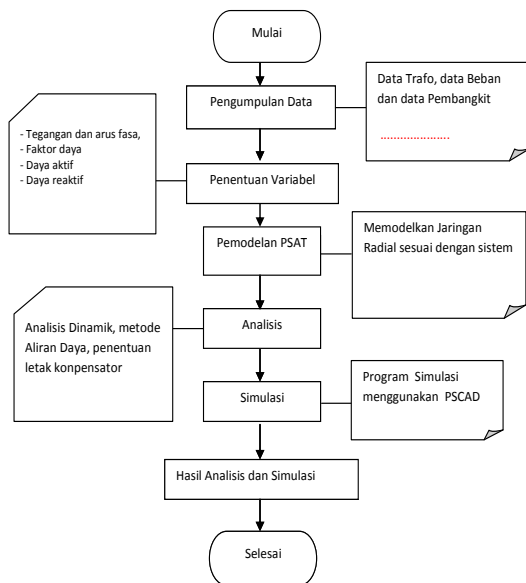
Hubung singkat juga dapat menimbulkan *voltage sag*. Di antara jenis hubung singkat simetris dan tidak simetris, hubung singkat tiga fasa memiliki pengaruh paling besar pada *voltage sag*. Untuk menentukan besarnya *voltage sag* dalam sistem distribusi model radial, dapat digunakan model pembagi tegangan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3. Impedansi Zs adalah impedansi sumber pada titik kopling umum (point of common coupling atau PCC) dan Zf adalah impedansi antara PCC dan titik gangguan.

$$Vsag = \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} E \tag{2}$$



Gambar 3. Model pembagi tegangan untuk komputasi *voltage sag* dalam sistem distribusi radial [7].

Diagram alir simulasi yang dilakukan untuk menganalisis *voltage sag* diberikan pada Gambar 4. Untuk penentuan letak kompensator dan untuk mengetahui bus terlemah dari hasil analisis load flow digunakan program *Power System Analysis Tool* (PSAT), sedangkan *software Power System Computer Aided Design* (PSCAD) *Student Version* digunakan untuk menganalisis skenario gangguan dan yang mau dianalisis.



Gambar 4. Diagram alir metode penelitian

III. DATA DAN PARAMETER SIMULASI

PT. Petrochina Bermuda Ltd., yang berlokasi di Sorong Papua mempunyai 2 sistem yang berdiri sendiri, yaitu sistem Walio dengan kapasitas 10x2,5 MW (25 MW) dan sistem KMT dengan kapasitas 4x2,5 MW (10 MW).

TABEL I  
DATA PEMBEBANAN SISTEM WALIO

WALIO	HP	MVA	MW(max)
Alpha	4870	5.190029	3.633
Main	150	0.159857	0.111
A2	1545	1.646529	1.1525
A3	11335	1.422729	0.9959
A4	680	0.724686	0.5072
A5	1160	1.236229	0.865
Charly	7305	7.785043	5.44953
Main	530	0.564829	0.39538
D	645	0.687386	0.4811
F	2270	2.419171	1.69342
G	1295	1.3801	0.966
J	2565	2.733557	1.913
Wakamuk	815	0.868557	0.60
Delta	5390	5.7442	4.02
Main	225	0.239786	0.167
B	755	0.804614	0.5632
C	1505	1.6039	1.12273
E	2125	2.264643	1.58188
EX	780	0.831257	0.58188
Echo	8117	8.650403	6.055
Main	810	0.863229	0.604
Kasim 10	3512	3.742789	2.619
Kasim 1	1170	1.246886	0.872
Jaya	2625	2.7975	1.958

TABEL II  
DATA PEMBEBANAN SISTEM KMT

KMT	HP	MVA	MW(max)
OCB - 1	2640	2.8134	1.96944
Kasim Line 1	1970	2.099	1.46962
K.U - 3,12	410	0.436	0.30586
K.B	260	0.277	0.19396
OCB - 2	4125	4.396	3.07725
Kasim II	1370	1.46	1.022
Cenderawasih	2755	2.93	2.055

Dari Tabel I dan Tabel II dapat diketahui bahwa total beban yang ada di sistem Walio sudah mencapai sekitar

85% atau sudah lebih dari 80% kapasitas generatornya, sehingga akan mempengaruhi ketangguhan sistem Walio. Sementara itu, untuk sistem KMT, total bebannya masih sekitar 50% dari kapasitas generatornya, sehingga masih efisien dalam memasok daya.

Perbedaan kondisi pembebanan antara sistem Walio dan sistem KMT tersebut menjadi dasar diusulkannya solusi interkoneksi agar persentase pembebanan pada sistem Walio dapat berkurang, dengan cara menambah pasokannya dari sistem KMT. Berdasarkan perhitungan, dengan melakukan interkoneksi didapatkan persentase pembebanan pada kedua sistem menjadi 74%.

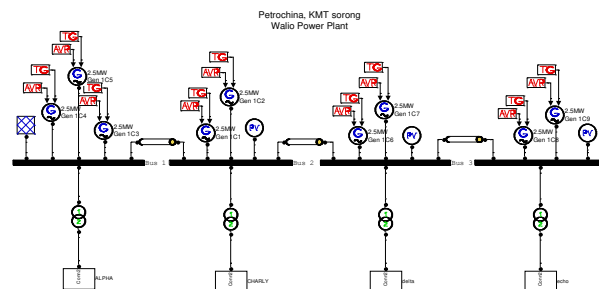
Ada beberapa skenario yang akan diujikan, yaitu simulasi *voltage sag* akibat gangguan hubung singkat dan akibat pengasutan motor. Dari dua gangguan tersebut akan disimulasikan metode kompensasi menggunakan D-Statcom dan interkoneksi.

TABEL III  
TREND DATA PEMBEBANAN GENERATOR TAHUN 2011

No.	Generator no.	Load	Load	Load	Load
		(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
		21-Jun	22-Jun	23-Jun	24-Jun
1	Centaur # 1	2450	2450	2450	2450
2	Centaur # 2	2500	2500	2500	2500
3	Centaur # 3	2370	2400	2450	2400
4	Centaur # 4	2500	2500	2500	2500
5	Centaur # 5	2200	2220	2300	2250
6	Centaur # 6	2300	2380	2350	2350
7	Centaur # 7	-	-	-	-
8	Centaur # 8	2150	2220	2200	2200
9	Centaur # 9	2000	2050	2050	2050
10	Centaur # 10	2300	2370	2350	2350
Total Load (kW)		20770	21090	21150	21050

Simulasi dilakukan dengan menggunakan parameter yang diambil dari kondisi pada saat beban puncak di sistem Walio, yaitu pada tanggal 23 Juni 2011. Sebagaimana terlihat dari Tabel III, pembebanan generator mendekati maksimal, terukur daya total 21,15 MW atau 94% dari kapasitas daya yang terpasang.

Kecilnya kapasitas daya yang tersedia pada sistem Walio menyebabkan berkurangnya *robustness* terhadap gangguan.



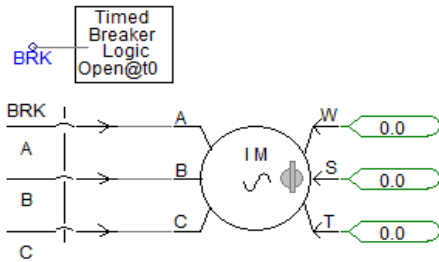
Gambar 5. Simulasi sistem Walio di PSAT pada kondisi normal untuk mengetahui bus terlemah

Rangkaian simulasi untuk sistem Walio ditunjukkan pada Gambar 5. PSAT digunakan untuk melakukan simulasi koordinasi sembilan generator pada sistem pembangkit Walio dengan mengasumsikan 1 generator pada posisi *off operation (maintenance)*.

Hasil simulasi *load flow* digunakan untuk mengetahui bus terlemah dari sistem dan penentuan letak

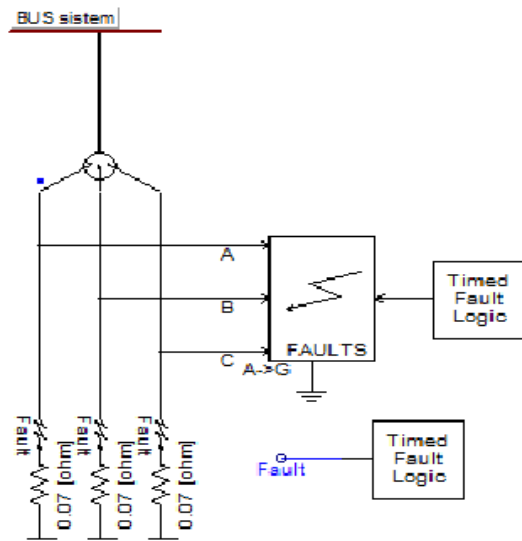
pemasangan D-Statcom.

Untuk simulasi pengasutan motor, dilakukan pemasangan *breaker* seperti ditunjukkan Gambar 6. Komponen *Timed Breaker Logic* digunakan untuk mengatur waktu kerja dari *breaker* pada simulasi pengasutan motor.



Gambar 6. Model tegangan untuk komputasi *voltage sag* dalam sistem distribusi radial menggunakan PSCAD

Untuk simulasi hubung singkat, dilakukan pemasangan rangkaian gangguan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Model simulasi hubung singkat digunakan untuk simulasi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah maupun tiga fasa ke tanah.

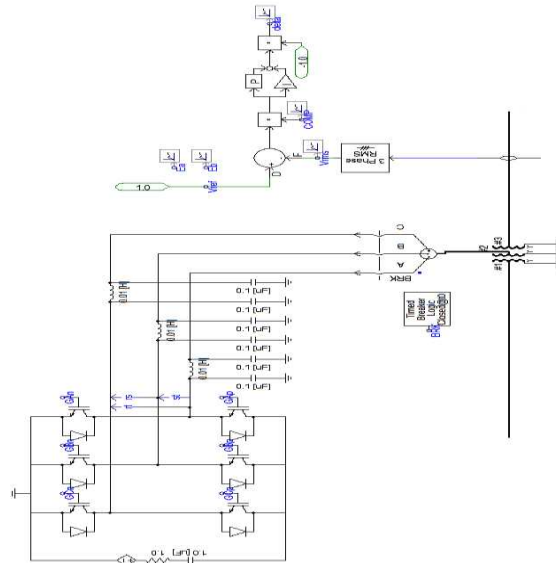


Gambar 7. Model simulasi hubung singkat untuk komputasi *voltage sag* menggunakan PSCAD

Untuk simulasi pemasangan kompensator menggunakan D-Statcom, digunakan rangkaian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Rangkaian pengendali PI berfungsi untuk memproses sinyal  $\delta$  untuk memroses kesalahan menjadi nol. Pada generator PWM, kendali sinyal sinusoidal adalah *phase-modulated* dengan cara mengatur sudut ( $\delta$ ) sinyal yang dibandingkan dengan sinyal bersegi tiga (*carrier*) untuk menghasilkan sinyal penyaklaran D-Statcom.

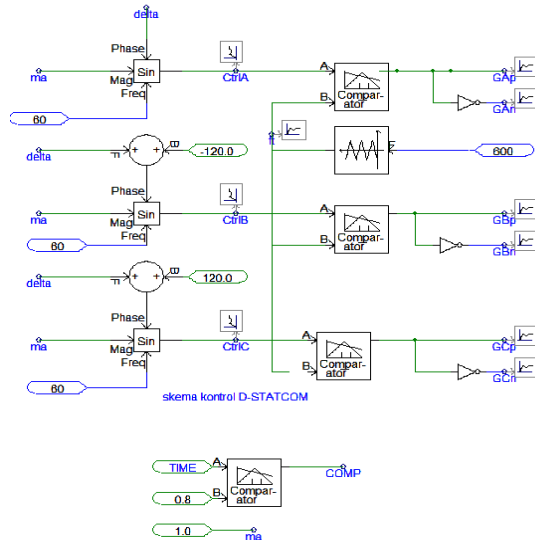
Parameter utama dalam pemodelan sinyal untuk penyaklaran D-Statcom adalah amplitudo modulasi (*ma*) pada sinyal  $V_{control}$ , dan sinyal segi tiga pada index modulasi frekuensi (*mf*). Index amplitudo modulasi (*ma*) dipertahankan tetap pada 1 pu, untuk memperoleh komponen dasar tagangan tinggi pada pengontrol

keluaran. Frekuensi switching ditetapkan pada 60 Hz.



Gambar 8. Simulasi D-Statcom menggunakan PSCAD [5].

Sudut modulasi diterapkan pada pembangkit sinyal PWM pada fasa A. untuk fasa B dan C dengan pergeseran  $120^\circ$  dan  $-120^\circ$ , setelah itu sinyal keluaran dari rangkaian komparator akan mentrigger rangkaian switching yang terdiri atas 6 IGBT. Penerapan pengendalian sangat sederhana dengan menggunakan sinyal tegangan sebagai variabel umpan balik dalam perencanaan pengontrolan, rangkaian kontrol VSC secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema kontrol D-Statcom [8].

IV. ANALISIS HASIL SIMULASI

Pada simulasi di penelitian ini tidak semua beban ESP disimulasikan dalam model motor. Karena keterbatasan *node* PSCAD, sebagian besar beban motor di modelkan berupa *fixed load*.

Ada beberapa skenario pemodelan dan simulasi yang akan diujikan :

- Analisis *voltage sag* akibat gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah sebelum Interkoneksi dan

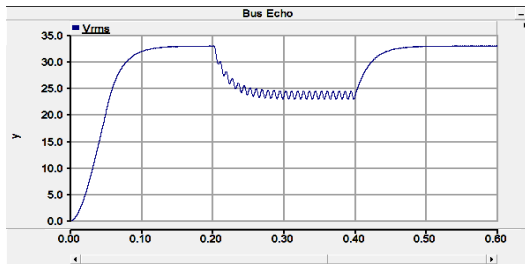
sebelum pemasangan D-Statcom yang kemudian dibandingkan ketika sudah interkoneksi atau sesudah pemasangan D-Statcom

- Analisis *voltage sag* akibat pengasutan motor ESP sebelum Interkoneksi dan sebelum pemasangan D-Statcom yang kemudian dibandingkan ketika sudah interkoneksi atau sesudah pemasangan D-Statcom

Dari kedua metode kemudian dibandingkan apakah pengaruh interkoneksi dan pemasangan D-Statcom terhadap respon transien pada bus yang paling lemah dapat memperbaiki tegangannya.

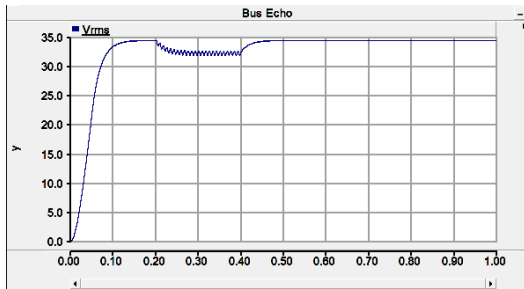
**a) Gangguan hubung singkat**

Hasil analisis *load flow* ketika dilakukan simulasi hubung singkat satu fasa ke tanah pada bus Echo di sistem kelistrikan Walio ditunjukkan pada gambar 10.

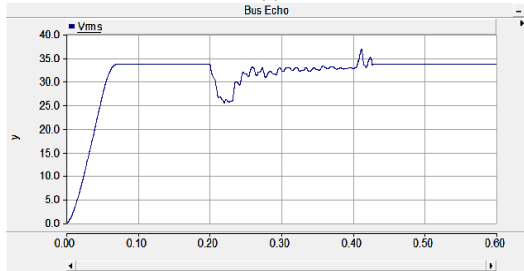


Gambar 10 Tegangan pada bus Echo sebelum proses interkoneksi Walio dengan KMT dan sebelum pemasangan D-Statcom

Hasil simulasi pada Gambar 10 menunjukkan bahwa tegangan di bus Echo ketika gangguan satu fasa ke tanah dalam waktu 2 detik mengalami penurunan tegangan dari 33,37 kV menjadi 25,53 kV atau sebesar 23% penurunan tegangan.



(a)



(b)

Gambar 11. Bentuk gelombang tegangan untuk gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (a) sesudah interkoneksi (b) Sesudah pemasangan D-Statcom

Hasil simulasi pada Gambar 11 (a) menunjukkan bahwa tegangan di bus Echo ketika sesudah ada interkoneksi mengalami perbaikan dari 25,53 kV menjadi 32,1 kV. Sedangkan Gambar 11 (b) menunjukkan bahwa tegangan di bus Echo ketika

sesudah ada pemasangan D-Statcom mengalami perbaikan dari 25,53 kV menjadi 32,7 kV.

TABEL IV  
PERBANDINGAN TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH PEMASANGAN INTERKONEKSI AKIBAT GANGGUAN SATU FASA KE TANAH

BUS	Sebelum pemasangan interkoneksi Vrms (kV)	Sesudah pemasangan interkoneksi Vrms (kV)
Echo	25,53	32,1

Hasil perhitungan optimasi tegangan, untuk analisis *voltage sag* yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dengan penerapan interkoneksi, yaitu:

Optimasi perbaikan kualitas tegangan:

$$V \text{ optimasi} = V \text{ interkoneksi} - V \text{ tanpa interkoneksi} = 32,10 - 25,53 = 6,57 \text{ kV}$$

TABEL V  
PERBANDINGAN TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH PEMASANGAN D-STATCOM AKIBAT GANGGUAN SATU FASA KE TANAH

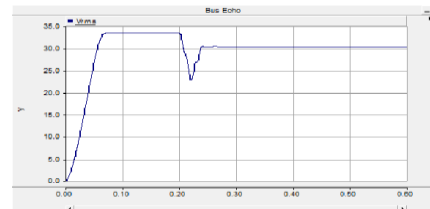
BUS	Sebelum pemasangan D-Statcom Vrms (kV)	Sesudah pemasangan D-Statcom Vrms (kV)
ECHO	25.53	32.7

Hasil penerapan D-Statcom untuk optimasi tegangan pada gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, yaitu:

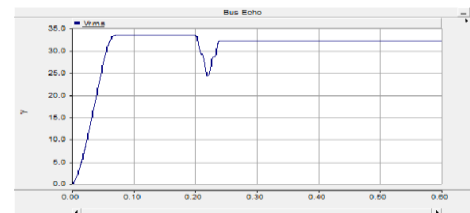
Optimasi perbaikan kualitas tegangan:

$$V \text{ optimasi} = V \text{ Dstatcom} - V \text{ tanpa Dstatcom} = 32,7 - 25,53 = 7,17 \text{ kV}$$

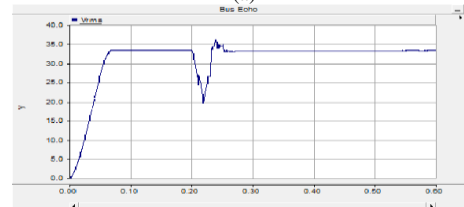
**b) Pengasutan 12 Unit Motor ESP 360HP**



Gambar 12. Bentuk gelombang tegangan untuk pengasutan 12 unit motor 360 HP sebelum pemasangan D-Statcom dan Interkoneksi



(a)



(b)

Gambar 13. Bentuk gelombang tegangan untuk pengasutan 12 unit motor 360 HP (a) sesudah pemasangan interkoneksi (b) sesudah pemasangan D-Statcom

Hasil simulasi pada Gambar 12 menunjukkan tegangan di bus Echo ketika pengasutan 12 unit motor

ESP sebelum interkoneksi dan sebelum pemasangan D-Statcom mengalami jatuh tegangan dari 33,37 kV menjadi 30,31 kV dengan *voltage sag* sampai dengan 22,8 kV.

Hasil simulasi pada Gambar 13 (a) menunjukkan bahwa tegangan di bus Echo ketika sesudah ada interkoneksi mengalami perbaikan dari 30,31 kV menjadi 32,14 kV. Sedangkan Gambar 13 (b) menunjukkan bahwa tegangan di bus Echo ketika sesudah ada pemasangan D-Statcom mengalami perbaikan dari 30,31 kV menjadi 33,17 kV.

TABEL VI

PERBANDINGAN TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH INTERKONEKSI AKIBAT PENGASUTAN 12 UNIT MOTOR 360 HP

BUS	Sebelum interkoneksi	Sesudah interkoneksi
	Vrms (kV)	Vrms (kV)
ECHO	30,31	32,14

Hasil penerapan interkoneksi untuk optimasi tegangan pada saat pengasutan 12 unit motor 360 HP, yaitu:

Optimasi perbaikan kualitas tegangan:

$$V \text{ optimasi} = V \text{ interkoneksi} - V \text{ tanpa interkoneksi} \\ = 32,14 - 30,31 = 1,83 \text{ kV}$$

TABEL VI

PERBANDINGAN TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH PEMASANGAN D-STATCOM AKIBAT PENGASUTAN 12 UNIT MOTOR 360 HP

BUS	Sebelum pemasangan D-Statcom	Sesudah pemasangan D-Statcom
	Vrms (kV)	Vrms (kV)
ECHO	30,31	33,17

Hasil penerapan D-Statcom untuk optimasi tegangan, daya aktif dan daya reaktif pada saat pengasutan 12 unit motor 360 HP, yaitu:

Optimasi perbaikan kualitas tegangan:

$$V \text{ optimasi} = V \text{ Dstatcom} - V \text{ tanpa Dstatcom} \\ = 33,17 - 30,31 = 2,86 \text{ kV}$$

Berdasarkan dari simulasi pengasutan motor, terlihat bahwa saat interkoneksi terdapat perbaikan tegangan sebesar 1,83 kV. Hal ini membuktikan peningkatan *robustness* pada sistem sehingga mempunyai respon lebih bagus saat interkoneksi ketika ada gangguan.

Saat simulasi menggunakan D-Statcom terdapat perbaikan tegangan sebesar 2,86 kV. Pada penelitian ini terlihat perbandingan antara metode interkoneksi

dengan pemasangan D-Statcom, dimana penggunaan D-Statcom lebih efektif dalam merespon gangguan.

## V. KESIMPULAN

Dari analisis hasil simulasi yang dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan sistem interkoneksi antara sistem Walio dan sistem KMT dapat memperbaiki profil tegangan di bus Echo sebesar 25% ketika terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, sedangkan perbaikannya hanya sebesar 5% jika terjadi pengasutan 12 unit motor dengan kapasitas masing-masing 360HP.
2. Penggunaan kompensator D-Statcom di bus Echo dapat memperbaiki profil tegangan 28% ketika terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, sedangkan perbaikannya hanya sebesar 8% jika terjadi pengasutan 12 unit motor dengan kapasitas masing-masing 360HP.

Nilai yang diperoleh tersebut tergantung pada desain dan parameter sistem serta kompensator yang dipilih pada saat simulasi, dapat disimpulkan bahwa penggunaan D-Statcom lebih efektif karena dapat bertindak memperbaiki tegangan langsung pada bus yang mengalami gangguan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Samineni, Satish, "Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage sag correction", University of Idaho, December 2003
- [2] IEEE Std 141-1993, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1993.
- [3] Dugan, C. Roger, McGranaghan, F. Mark, Santoso, Surya dan Beaty, Wayne. H., "Electrical Power Systems Quality", Second Edition, 2004.
- [4] Dung Tran Khanh Viet, islanding Detection for utility interconnection of multiple distributed generator, university of trois rivieres, may 2008.
- [5] *Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS)*, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 12, Issue 4, October 1997, pp. 1848-1853. doi: 10.1109/61.634216
- [6] K. R. Padiyar, Facts Controllers In Power Transmission And Distribution. New Delhi: New Age International., 2007
- [7] El-Shennawy, I. Tarek dkk., "A Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Mitigation in a Refinery with Induction Motors Loads", American J. ofEngineering and Applied Sciences 3 (1): 144-15, 2010.
- [8] O. Anaya-Lara, E. Acha, "Modeling and analysis of custom power systems by PSCAD/EMTDC", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 1, pp.266-272, January 2002.