

Aplikasi *Magnetic Energy Recovery Switch* sebagai *Dynamic Voltage Restorer* pada motor Induksi

Dwi Dharma Artakusuma¹, Fransisco Danang Wijaya², Eka Firmansyah³

Abstract—Renewable energy source likes solar panel and wind turbine have intermittent character from instability power source generated. The instability power source can make dip voltage in power grid which happen in half cycle until few seconds. To stabilize the voltage in power grid from dip voltage, some methods have been developed using power electronics technology like VSI inverter, STATCOM, energy storage, OLTC, and MERS. The power electronic circuits have some advantages, such as small dimensional size and lightweight to keep voltage in power grid. In this paper, the MERS circuit was applied in induction motor which has small full bridge circuit, uncomplexity computation, and low switching frequency, so it needs low end hardware requirement. This paper proposed the use of MERS dc capacitor with 50% value from induction motor resistance. The result shows that MERS has advantage and can keep the voltage in power grid when the voltage below 39% and 15% above rated voltage (220 V_{rms}) with the recovery time around 0.3 second and keep the dip voltage over 1 second.

Intisari— Sumber energi terbarukan berupa panel surya dan turbin angin bersifat *intermitten* dikarenakan ketidakstabilan daya yang dihasilkan. Ketidakstabilan daya menyebabkan terjadinya *dip voltage* pada tegangan jaringan, baik dalam beberapa siklus gelombang maupun sampai beberapa detik. Untuk menjaga kestabilan tegangan pada jaringan dari *dip voltage*, beberapa metode telah dikembangkan dengan menggunakan teknologi elektronika daya, seperti *inverter VSI*, *STATCOM*, *energy storage*, *OLTC*, dan rangkaian *MERS*. Rangkaian elektronika daya mempunyai keuntungan berupa dimensi rangkaian yang kecil dan kompak untuk menjaga tegangan jaringan. Pada makalah ini, rangkaian *MERS* diaplikasikan pada motor induksi karena kesederhanaan rangkaian yang berbentuk *full-bridge*, komputasi yang tidak kompleks, dan penyakelaran frekuensi rendah sehingga tidak membutuhkan perancangan perangkat keras *high end*. Makalah ini mengajukan perhitungan nilai kapasitor dc pada rangkaian *MERS* dengan nilai 50% dari hambatan total motor induksi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *MERS* mempunyai kelebihan dan dapat menjaga tegangan jaringan saat tegangan lebih rendah dari 220 V_{rms} sampai 39% dan saat tegangan lebih tinggi dari 220 V_{rms} sampai 15%. Waktu perbaikan yang diperlukan adalah sekitar 0,3 detik dan tegangan dapat terjaga dari *dip voltage* lebih dari 1 detik.

Kata Kunci— *dip voltage*; *intermitten renewable energy sources*, *induction motor*, *MERS*.

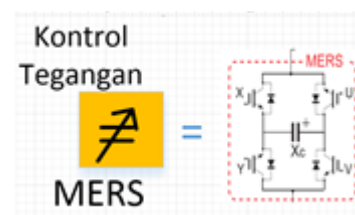
I. PENDAHULUAN

Dengan berkembangnya kebutuhan energi listrik, beberapa alternatif energi listrik terbarukan seperti panel surya dan

turbin angin yang tergolong sumber *intermittent* menjadi pilihan. Di sisi lain, penggunaan sumber *intermittent* dengan persentase penetrasi yang besar/meningkat pada jaringan listrik menimbulkan beberapa masalah. Salah satu masalah yang muncul adalah *dip voltage*. Menurut standar EN 50160, pengertian *dip voltage* adalah kejadian ketika tegangan listrik kurang dari 90% dari tegangan *rated* (220 V_{rms} di Indonesia) selama satu menit atau kurang, berkisar dari setengah siklus sampai dengan beberapa detik [1]. Selain itu, analisis EPRI tentang *dip voltage* adalah 46% mengalami penurunan *V_{RMS}* kurang dari 30% (154 V_{rms}) pada jaringan listrik mempunyai durasi lebih dari 100 ms [2].

Terjadinya *dip voltage* pada jaringan listrik dapat disebabkan oleh beberapa hal, seperti sumber energi listrik yang terganggu, adanya awan ataupun hujan pada sumber energi panel surya, kecepatan angin yang rendah pada sumber energi listrik turbin angin, atau hubung singkat pada distribusi jaringan listrik yang disebabkan oleh petir ataupun ranting pohon.

Terjadinya *dip voltage* pada jaringan listrik juga menimbulkan beberapa masalah, seperti kerusakan pada *rotor-side converter* (RSC) pada sumber energi listrik turbin angin [3] dan aktivasi proteksi pada *inverter* sel surya yang berakibat hilangnya sumber energi listrik pada jaringan listrik yang besar [4]. Contohnya adalah di Jerman, dengan total sumber energi listrik yang berasal dari tenaga surya pada musim panas sebanding dengan dua puluh pembangkit batubara modern. Pada sisi konsumen, *dip voltage* menyebabkan ketidaknyamanan, seperti terjadinya kedip pada penerangan [1] dan kerusakan pada alat elektronika umumnya yang menggunakan sistem penyakelaran pada bagian *power supply*.



Gbr. 1 Kontrol tegangan MERS.

Perbaikan *dip voltage* dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian besar, yaitu metode berdasarkan pengendalian pada sumber energi listrik dan metode yang berdasarkan penggunaan *external device*, seperti penggunaan teknologi elektronika daya [5]. Beberapa contoh teknologi elektronika daya adalah *inverter VSI* [6], menggunakan *energy storage* [7], menggunakan *STATCOM* [8], [9], menggunakan *OLTC* [10], dan menggunakan rangkaian *Magnetic Energy Recovery System* (*MERS*).

^{1,2,3} Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika no 2, Yogyakarta, 55281 INDONESIA (Email: ¹dwidharma_te03@mail.ugm.ac.id, ²fdwijaya2000@gmail.com, ³eka.firmansyah@gmail.com).

Dari aplikasi tersebut, rangkaian MERS mempunyai kelebihan dalam komputasi yang tidak kompleks dan rangkaian yang sederhana. Rangkaian MERS menggunakan kapasitor dc dirangkai dengan MOSFET/IGBT yang nilai reaktansnya diatur menggunakan sudut penyulutan, sehingga dapat mengatur tegangan pada jaringan.

Pada makalah ini, dilakukan perancangan perhitungan kapasitor dc untuk penyakelaran pada topologi MERS *full-bridge* dirangkai seri, seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 1, sebagai *dynamic voltage restorer* (DVR) pada motor induksi [11]-[14]. Makalah ini melakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak *Power Simulator* (PSIM) terhadap hasil perancangan perhitungan kapasitor dc yang nilai reaktansnya divariasikan dengan sistem penyakelaran. Pengujian dilakukan dengan menjaga kualitas tegangan pada motor induksi dengan mengubah nilai tegangan sumber.

II. TOPOLOGI RANGKAIAN MERS FULL-BRIDGE

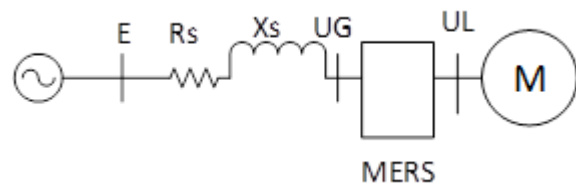
Rangkaian MERS pada makalah ini dirangkai seri dengan motor induksi, ditunjukkan pada Gbr. 2, dengan *E* adalah sumber tegangan, *Rs* dan *Xs* adalah impedans pada kabel jaringan, *UG* adalah tegangan sebelum MERS, dan *UL* adalah tegangan pada motor induksi. Bentuk topologi rangkaian MERS *full-bridge* ditunjukkan pada Gbr. 3. Rangkaian ini terdiri atas beberapa bagian, yaitu rangkaian penyakelaran MERS (IGBT *full-bridge*), kapasitor dc MERS, rangkaian pengendali, rangkaian impedans pada jaringan, dan rangkaian beban.

Rangkaian penyakelaran MERS *full-bridge* menggunakan empat buah saklar elektronis. Saklar elektronis yang digunakan untuk penyakelaran frekuensi rendah adalah IGBT. Rangkaian ini akan diatur lamanya waktu *charging* dan *discharging* kapasitor dc MERS melalui proses penyakelaran. Pada makalah ini, proses penyakelaran dilakukan pada frekuensi 50 Hz. Keadaan *ON* dan *OFF* IGBT diatur oleh sinyal *pulse-width modulation* (PWM).

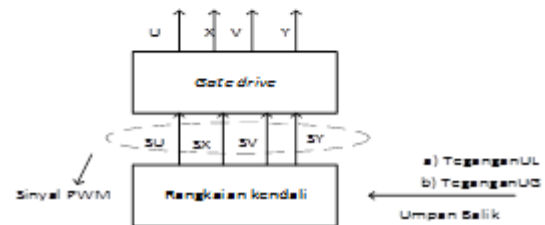
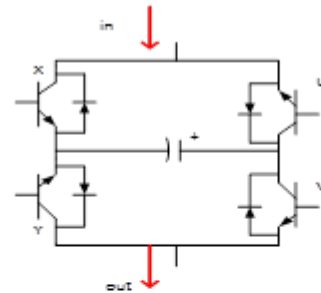
Metode PWM *dc-offset*, *balance*, dan *discontinue* yang digunakan berdasarkan penelitian sebelumnya [12]. Pada metode PWM *dc-offset*, nilai reaktans terukur pada MERS lebih besar dari nilai reaktans induktans pada jaringan. Untuk metode *balance*, nilai reaktans terukur pada MERS bernilai sama dengan nilai reaktans induktans pada jaringan. Sedangkan pada metode *discontinue*, nilai reaktans terukur pada MERS lebih rendah dari nilai reaktans induktans pada jaringan.

Dengan mengatur nilai reaktans MERS, nilai reaktans pada jaringan yang berpengaruh pada tegangan masukan pada motor induksi yang dijaga kestabilannya dapat diatur sehingga dayanya menjadi stabil. Seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 4, saat sumber energi terbarukan mempunyai sumber tegangan yang lebih dari 220 Vrms (*E1*), maka reaktans pada MERS diatur pada metode *dc-offset* sehingga nilai impedans *UM1* lebih besar dari impedans beban motor induksi, sehingga terjaga pada tegangan 220 Vrms (*UL*). Saat sumber energi terbarukan mempunyai sumber tegangan yang rendah dari 220 Vrms (*E2*), maka reaktans MERS diatur sehingga reaktansnya mendekati nilai reaktans pada jaringan (*UM2*) yang

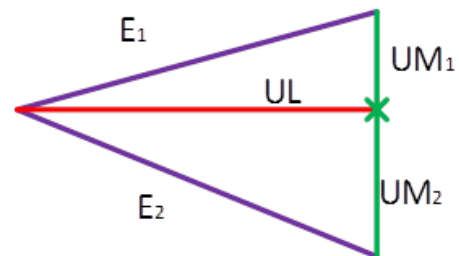
menyebabkan impedans beban motor induksi lebih besar dari impedans jaringan.



Gbr. 2 Rangkaian ketika menggunakan MERS untuk memperbaiki daya motor induksi.



Gbr. 3 Topologi rangkaian MERS full-bridge.



Gbr. 4 Perbaikan daya pada beban motor induksi dengan menjaga tegangan menggunakan kompensasi MERS.

III. PERANCANGAN KAPASITOR DC PADA MERS

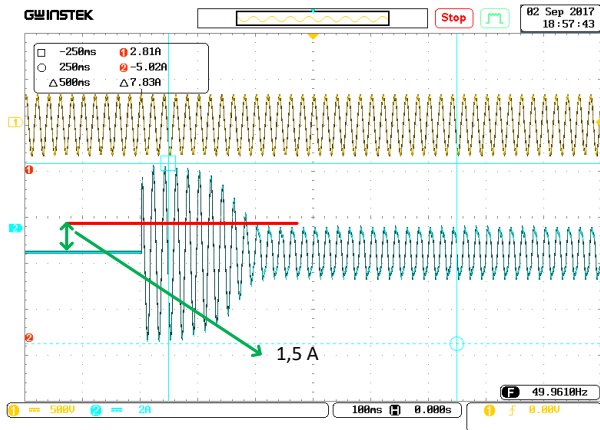
Kapasitor dc digunakan sebagai reaktans kapasitif MERS untuk mengatur besar nilai tegangan masukan pada beban motor induksi. Dalam perancangan ini nilai kapasitor dc ditentukan dari nilai reaktans induktif motor induksi sehingga sudut penyakelaran dapat diketahui.

Persamaan (2) diperoleh dari (1), yaitu permodelan motor induksi dirangkai seri dengan rangkaian MERS.

$$I = V / (R^2 + X_L^2)^{1/2} \tag{1}$$

$$I = V / (R^2 + (X_L - X_C)^2)^{1/2} \tag{2}$$

dengan I adalah arus masukan motor induksi, V adalah tegangan motor induksi, R adalah hambatan total motor induksi, X_L adalah reaktans induktif motor induksi, dan X_C adalah reaktans kapasitif rangkaian MERS. Pada perancangan ini diambil sebuah model berupa motor pompa air yang merupakan motor induksi dengan spesifikasi disajikan pada Tabel I. Nilai kapasitor dc yang digunakan bernilai setengah dari hambatan total motor induksi. Tujuannya adalah untuk memudahkan dalam mengatur sudut penyakelaran pada rangkaian MERS.



Gbr. 5 Sinyal tegangan (kuning) dan arus motor induksi (biru) dengan arus puncak saat stabil sekitar 1,5 A.

TABEL I
DATA MOTOR INDUKSI

Load –Induction Motor Panasonic 1 Phase Induction Motor	
Tegangan	220 V
Arus	1.55 A
Frekuensi	Hz 50

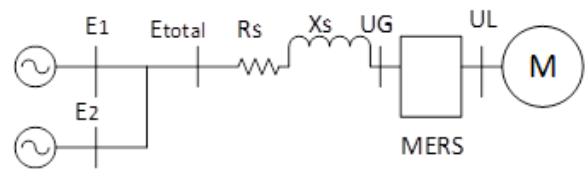
TABEL II
HASIL PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN PEMODELAN BEBAN MOTOR INDUKSI

Load –Induction Motor Panasonic 1 Phase Induction Motor	
Hambatan terukur	29 Ohm
Reaktans induksi terhitung	650 mH

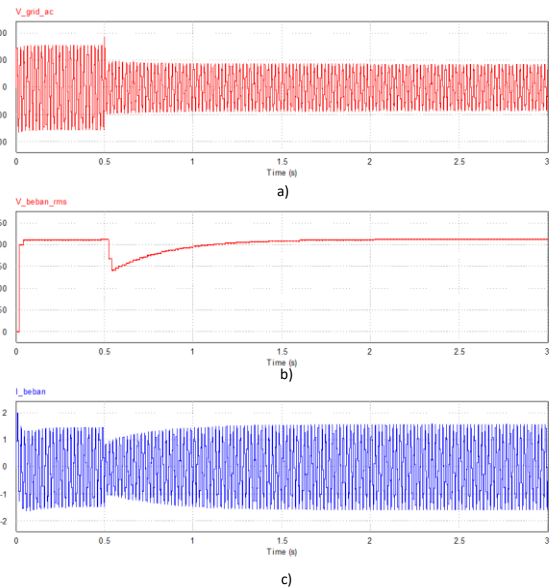
Untuk mendapatkan pemodelan nilai komponen impedans motor induksi, digunakan ohmmeter. Nilai hambatan motor induksi saat tidak dialiri arus listrik adalah sekitar 29 ohm. Nilai reaktans induktifnya diuji dengan memberikan tegangan ke motor induksi dan diukur arus saat stabil seperti ditunjukkan pada Gbr. 5.

Pada Gbr. 5, pengujian motor induksi dilakukan dengan memberi tegangan sumber 220 Vrms (311 Vpuncak) dan didapatkan arus puncak saat stabil sekitar 1,5 A. Dengan menggunakan (1), dimasukan nilai hambatan motor induksi, arus puncak saat kondisi stabil operasi, dan tegangan puncak saat kondisi stabil. Diperoleh nilai reaktans induktans sekitar 650 mH seperti ditunjukkan pada Tabel II.

$$C_{MERS} = 2 / (2 * \pi * f * R) \tag{3}$$



Gbr. 6 Pemodelan pengujian rangkaian MERS saat variasi sumber tegangan.



Gbr. 7 Hasil simulasi dengan sumber tegangan 145 Vrms dapat dijaga 217,8 Vrms pada tegangan beban motor induksi, a) Sumber tegangan b)Tegangan motor induksi, c) Arus motor induksi.

Perhitungan kapasitor MERS dilakukan menggunakan (3), sehingga didapatkan nilai kapasitor sebesar 220 μ F, yang digunakan untuk rangkaian MERS.

IV. SIMULASI DAN HASIL

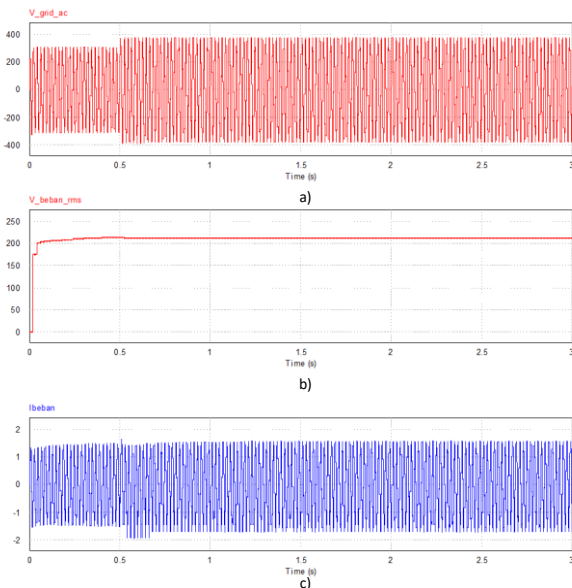
Data-data dari perancangan disimulasikan menggunakan perangkat lunak PSIM yang dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu kemampuan rangkaian MERS dalam *recovery energy* dan kemampuan rangkaian MERS saat DVR.

A. Rangkaian MERS Sebagai Energy Recovery

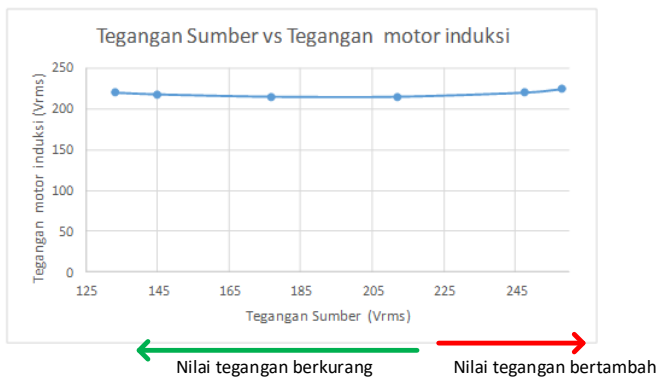
Simulasi rangkaian MERS sebagai *energy recovery* dilakukan untuk mengetahui cara perancangan penyakelaran MERS dapat menjaga kestabilan tegangan pada motor induksi saat tegangan sumber bervariasi dari tegangan *rated* (220 Vrms). Parameter kemudian dimasukkan ke simulasi, seperti ditunjukkan pada Gbr. 6.

Nilai tegangan dari sumber tegangan diubah-ubah dengan rentang di bawah tegangan *rated* dan di atas tegangan *rated*. Agar dapat menjaga tegangan masukan pada beban motor induksi pada kisaran 220 Vrms, maka penyakelaran pada rangkaian MERS menggunakan *dc-offset bypass*, *balance*, dan *discontinue*.

Saat sumber tegangan lebih rendah dari tegangan 220 Vrms, penyakelaran rangkaian MERS menggunakan *dc-offset*, sedangkan saat sumber tegangan lebih tinggi dari tegangan 220 Vrms, penyakelaran rangkaian menggunakan *discontinue*.



Gbr. 8 Hasil simulasi dengan sumber tegangan 258 Vrms dapat dijaga 224 Vrms pada tegangan beban motor induksi. a) Sumber tegangan, b) Tegangan motor induksi, c) Arus motor induksi.



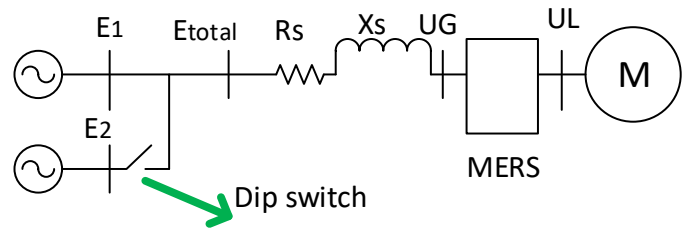
Gbr. 9 Hasil perbaikan MERS pada tegangan masukan beban motor induksi.

Pengujian dengan menggunakan sumber tegangan 145 Vrms ditunjukkan pada Gbr. 7, dengan metode penyakelaran metode *dc-offset bypass*. Untuk pengujian dengan sumber tegangan di atas tegangan *rated*, yaitu 258 Vrms, digunakan metode penyakelaran *discontinue*, seperti ditunjukkan pada Gbr. 8.

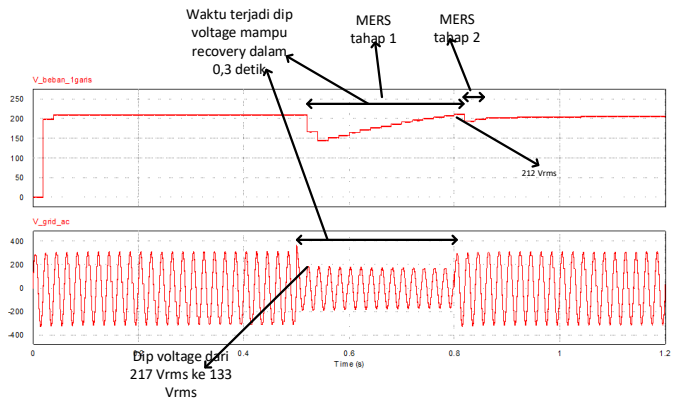
Hasil pengujian rangkaian MERS dengan variasi sumber tegangan diperlihatkan pada Gbr. 9. Terlihat bahwa rangkaian MERS yang dirancang mampu menjaga tegangan pada motor induksi dengan variasi tegangan lebih rendah dari tegangan *rated* (220 Vrms) sampai dengan 39% (133 Vrms) dan tegangan lebih tinggi dari tegangan *rated* (220 Vrms) sampai dengan 15% (258 Vrms).

B. Rangkaian MERS Sebagai Dynamic Voltage Restorer

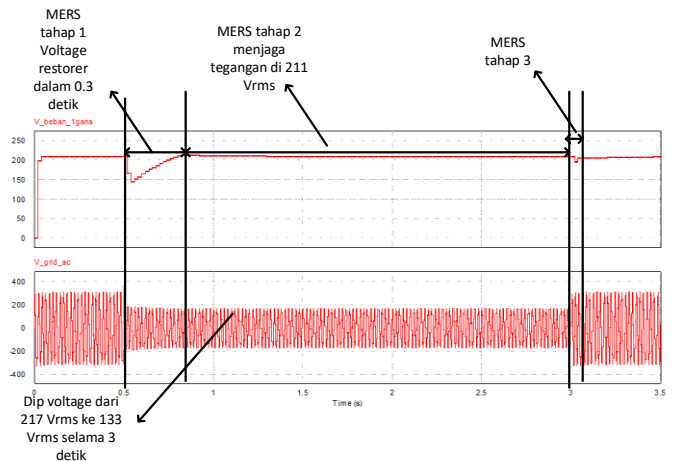
Simulasi rangkaian MERS diuji dengan *dip voltage* seperti ditunjukkan dengan model pada Gbr. 10. Sistem diuji seberapa cepat kemampuannya dalam memperbaiki *dip voltage* dan dilakukan juga pengujian rangkaian MERS dalam mempertahankan tegangan motor induksi saat terjadi *dip voltage*.



Gbr. 10 Pemodelan pengujian simulasi rangkaian MERS saat terjadi *dip voltage*.



Gbr. 11 Hasil pengujian simulasi rangkaian MERS saat terjadi *dip voltage*.



Gbr. 12 Hasil pengujian simulasi rangkaian MERS dengan durasi *dip voltage* 3 detik.

Pengujian kecepatan pada perancangan rangkaian MERS sebagai DVR ditunjukkan pada Gbr. 11. Dengan melakukan *dip voltage* dari 217 Vrms ke 125 Vrms dalam waktu 0,3 detik diperoleh hasil bahwa rangkaian MERS mampu menjaga tegangan pada motor induksi ke 210 Vrms.

Selanjutnya, pengujian dengan *dip voltage* yang mempunyai durasi 3 detik ditunjukkan pada Gbr. 12. Rangkaian MERS mampu menjaga tegangan kembali setelah 0,3 detik sampai dengan 3 detik.

Dari pengujian, rangkaian MERS memerlukan tiga tahapan, yaitu MERS tahap pertama untuk mempercepat perbaikan tegangan, tahap kedua untuk dapat menjaga tegangan saat *dip voltage* dengan durasi lebih dari 0,3 detik, dan tahap ketiga saat sumber tegangan sesuai dengan tegangan *rated*.

V. KESIMPULAN

Perancangan kapasitor dc yang diterapkan pada rangkaian MERS telah dipaparkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa MERS dapat digunakan sebagai salah satu solusi DVR, yaitu MERS dapat menjaga tegangan sampai 39% (133 Vrms) dari tegangan *rated* (220 Vrms). Waktu yang dibutuhkan rangkaian MERS untuk menjaga tegangan dari *dip voltage* berkisar 0,3 detik, dan mampu menjaga tegangan *dip voltage* lebih dari 1 detik.

Dalam pengendalian penyakelaran, rangkaian MERS menggunakan frekuensi rendah 50 Hz dengan duty cycle 50%. Pada tahap pengendalian pensakelaran, rangkaian MERS membutuhkan tiga tahap, yaitu tahap awal saat terjadi *dip voltage*, dilanjutkan tahap untuk menjaga tegangan selama terjadi *dip voltage*, dan tahap saat *dip voltage* kembali ke tegangan *rated*. Rangkaian MERS yang diuji mampu memenuhi standar *dip voltage* untuk durasi panjang dengan jatuh tegangan awal sebesar 30% dan 500 milidetik berikutnya sebesar 20%, seperti yang tercantum pada IEEE 446 dan IEEE 1100.

REFERENSI

- [1] H. Markiewicz and A. Klajn, *Voltage Disturbances*, United Kingdom: Copper Development Association, 2004.
- [2] K.J. Cornick dan H.Q. Li. "Power Quality and Voltage Dips Problem, Requirements, responsibilities," *Proc. APSCOM*, 2000, hal. 149-156.
- [3] S. Xiao, G. Yang, dan H. Zhou, "A LVRT Control Strategy based on Flux Tracking for DFIG-based Wind Power Systems," *Proc. ECCE*, 2011, hal. 76-82.
- [4] M. Biskoping, S. Richter, dan R.W. De Doncker, "Inverter based Testbench for Photovoltaic Inverters in Compliance with Medium-Voltage Grid Codes," *Proc. ICRERA*, 2012, hal. 1-6.
- [5] L. Chang, "LVRT Control Strategy of CSC-PMSG-WGS Based on PIR Controller," *Proc. PEDG*, 2016, hal. 1-6.
- [6] Y.A.I. Mohamed, E.F. El Saadany, dan S. Member, "Hybrid Variable-Structure Control With Evolutionary Optimum-Tuning Algorithm for Fast Grid-Voltage Regulation Using Inverter-Based Distributed Generation." *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 3, hal. 1334–1341, 2008.
- [7] V. Khadkikar, R.K. Varma, R. Seethapathy, and S. Member, "Grid Voltage Regulation Utilizing Storage Batteries in PV Solar – Wind Plant based Distributed Generation System," *Proc. EPEC*, 2009, hal. 1–6.
- [8] B.W. França, S. Member, L.F. Silva, M.A. Aredes, S. Member, dan M. Aredes, "An Improved iUPQC Controller to Provide Additional Grid-Voltage Regulation as a STATCOM." *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 3, hal. 1345–1352, March 2015.
- [9] M. Azharuddin and S.R.Gaigowal, "Voltage Regulation by Grid Connected PV-STATCOM," *Proc. ICPEDC*, 2017, hal. 472–477.
- [10] G. Ram *et al.*, "Design of a Power-Electronic-Assisted OLTC for Grid Voltage Regulation." *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 30, No. 3, hal. 1086–1095, 2015.
- [11] D. Shiojima, M. Cheng, T. Isobe, dan R. Shimada, "Control and Design Principle of SVC-MERS – a New Reactive Power Compensator with Line Frequency Switching and Small Capacitor –," *Proc. ECCE*, 2012, hal. 2045-2052.
- [12] J.A. Wiik, T. Isobe, T. Takaku, F.D. Wijaya, dan K. Usuki, "Feasible Series Compensation Applications using Magnetic Energy Recovery Switch (MERS) Magnetic Energy Recovery Switch (MERS)," *Proc. European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007, hal. 1-9.
- [13] R. M. Imran dan J. Srivastava, "Using of Dynamic Voltage Restorer (DVR) to Mitigate Sag & Swell Voltage during Single Line to Ground & Three- Phase Faults." *IJMER*, Vol. 4, No. 1, hal. 180–188, 2014.
- [14] Priyanka Kumari dan Vijay Kumar Garg, "Power Quality Enhancement using Dynamic Voltage." *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 3, No. 8, 2013.