

# Desain Koordinasi Sistem Proteksi untuk *Microgrid* Berbasis *Inverter*

Muhammad Ikhsan K.<sup>1</sup>, Kevin M. Banjar-Nahor<sup>2</sup>, Nanang Hariyanto<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Prodi Program Studi Teknik Tenaga Listrik Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi  
Bandung

Email: muhichsan221999@gmail.com, kevin.marojahan@itb.ac.id, nanang.hariyanto@stei.itb.ac.id

**Abstrak**—Pada sistem *microgrid* berbasis *inverter* terdapat masalah terkait kecilnya level arus hubung singkat. Hal ini terjadi karena komponen dari *inverter* yaitu *switch*, yang biasanya IGBT atau MOSFET, memiliki batas arus tertentu yang tidak boleh terlewat untuk menjaga integritas komponen saklar elektronik. Arus gangguan dari *inverter* ini dapat bernilai lebih kecil dari arus *pickup* rele arus lebih konvensional. Hal ini berpotensi mengakibatkan gagalnya deteksi gangguan berbasis arus lebih, yang umum dipakai di tegangan rendah dan menengah. Alternatif solusi untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan rele 51V yang memiliki arus *pickup* lebih rendah ketika rele membaca tegangan jatuh. Paper ini akan membahas perancangan dan evaluasi proteksi arus lebih, koordinasi proteksi, dan pengaruh penggunaan NGR terhadap koordinasi proteksi di sistem *microgrid* berbasis *inverter*. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak DiGSI/LENT Power Factory untuk beberapa skenario pembangkitan, impedansi gangguan, lokasi gangguan, dan jenis gangguan. Dari studi ini, disimpulkan bahwa rele 51V mampu mengatasi persoalan tidak sensitifnya rele arus lebih konvensional dan juga direkomendasikan agar NGR tidak digunakan pada sistem *microgrid* berbasis *inverter* sehingga sistem dapat dioperasikan dengan pengetanahan langsung.

**Kata Kunci**—*inverter*, rele arus lebih, hubung singkat, *microgrid*, proteksi.

## I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan penduduk yang tersebar sehingga sangat sulit untuk mencapai rasio elektrifikasi 100%. Menurut BPS, rasio elektrifikasi di Indonesia saat ini di angka 98,89% [1]. Hal ini adalah juga didukung oleh usaha Pemerintah Indonesia untuk menaikkan elektrifikasi nasional dan penggunaan energi baru terbarukan (EBT). Perpres No. 22 tahun 2017 menerangkan target pemanfaatan EBT pada bauran energi nasional mencapai 23% di 2025 dan 31% di 2030. Namun dalam realisasinya, per April 2021 ini penggunaan EBT masih diangka 13.55% [2]. Penggunaan *microgrid* terus berkembang dengan pesat dan menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi sulitnya elektrifikasi di berbagai wilayah. Salah satu faktor pendorongnya adalah biaya investasi pembangkit berbasis energi terbarukan yang semakin turun. Pertumbuhan utilisasi energi terbarukan yang sangat pesat [3] akan tetap menjadi *driving-force* utama pertumbuhan *microgrid* di tahun-tahun mendatang.

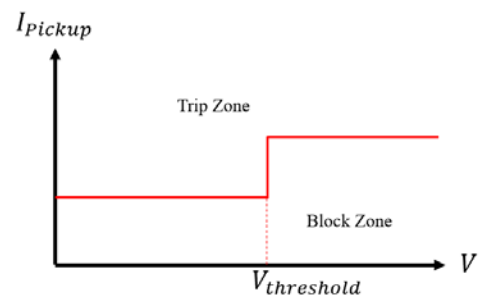
Masuknya pembangkit berbasis *inverter* pada sistem *microgrid* konvensional yang berbasis pembangkit mesin sinkron seperti PLTD menimbulkan permasalahan pada sistem proteksi konvensional berbasis arus lebih. Rating

arus dan tegangan dari *inverter* banyak ditentukan dari karakteristik *switch* yang biasanya adalah MOSFET dan IGBT. Arus gangguan dari *inverter* biasanya bernilai sekitar 1-2 kali arus rating. Penelitian lain yang menguji enam PV komersial melaporkan bahwa arus gangguan yang mengalir sekitar 1.2 arus rating [4].

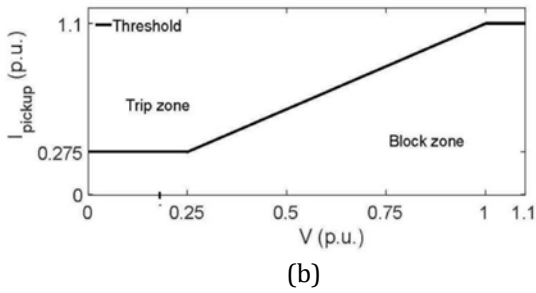
Arus gangguan yang kecil dari pembangkit berbasis *inverter* menyebabkan sistem proteksi pada sistem tenaga eksisting tidak dapat mendeteksi gangguan sehingga perlu diperbaiki. Gangguan hubung singkat yang terjadi ketika pembangkit *inverter* dominan bisa tidak terisolasi karena arus gangguan dari pembangkit *inverter* tidak dapat dengan mudah dibedakan dari arus normal operasinya [5]. Untuk mengatasi persoalan proteksi tersebut, saat ini di beberapa *microgrid* di Indonesia, dilakukan *oversizing inverter*, misalkan 4 kali dari kapasitas pembangkit EBT dengan harapan akan menaikkan besar arus gangguan dari *inverter* sehingga dapat dideteksi oleh rele arus lebih konvensional. Hal ini juga dimotivasi oleh insinyur dan teknisi di sistem kelistrikan tegangan menengah dan tegangan tinggi yang sudah terbiasa dengan kaidah proteksi berbasis rele lebih. Namun tentunya solusi ini tidaklah efektif secara biaya. Perlu ada upaya untuk menghadirkan solusi proteksi berbasis arus lebih di sistem *microgrid* yang tetap selektif dan andal. Dari sana, kami mengidentifikasi celah sekaligus kontribusi untuk melakukan penelitian mengenai perancangan rele arus lebih yang bisa mendeteksi arus gangguan yang kecil di sistem *microgrid* berbasis *inverter*.

## II. USULAN PENGGUNAAN RELE PROTEKSI

Terdapat dua jenis rele 51V yang sering digunakan yaitu *voltage-controlled overcurrent relay* (VC-OCR) dan *voltage restrained overcurrent relay* (VR-OCR). Rele arus lebih ini akan *pickup* ketika arus dan tegangan yang dibaca rele berada pada trip zone. [6].



(a)



Gambar 1. Rele 51V (a) Voltage controlled overcurrent relay, (b) Voltage restrained overcurrent relay

Dalam studi ini digunakan rele 51V *voltage-controlled overcurrent relay (VC-OCR)*. Rele ini *pickup* ketika besar tegangan gangguan yang terbaca rele lebih kecil dari  $V_{threshold}$  dan arus gangguan lebih besar dari arus *pickup*. Tegangan ambang batas ( $V_{threshold}$ ) yang dipilih bernilai 0.85 pu dan arus *pickup* 51V yang dipilih sebesar 30-50% arus beban puncak. Kurva karakteristik arus waktu dari 51V mengikuti persamaan berikut:

$$T = TD * \left[ \frac{a}{\left( \frac{I}{I_{pickup}} \right)^c - 1} + b \right]$$

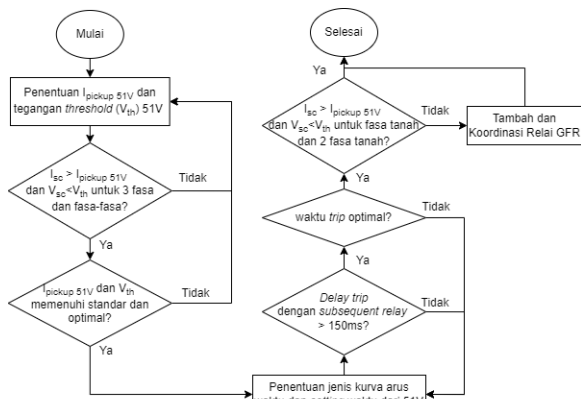
Dimana TD = time dial multiplier,  $I_{pickup}$  = arus *pickup*.

TABEL I

KURVA KARAKTERISTIK ARUS WAKTU STANDAR IEC DAN US [7]

Nama Kurva	Bentuk Kurva	a	b	c
IEC (C1)	Standard Inverse	0.14	0	0.02
IEC (C2)	Very Inverse	13.5	0	1
IEC (C3)	Extremely Inverse	80	0	2
IEC (C4)	Long-time Inverse	120	0	1
IEC (C5)	Short-time Inverse	0.05	0	0.04
US (U1)	Moderately Inverse	0.0104	0.0226	0.02
US (U2)	Inverse	5.95	0.180	2
US (U3)	Very Inverse	3.88	0.0963	2
US (U4)	Extremely Inverse	5.67	0.0352	2
US (U5)	Short-time Inverse	0.00342	0.00262	0.02

Berikut adalah diagram alir dalam mengkoordinasikan rele 51V dalam studi ini.

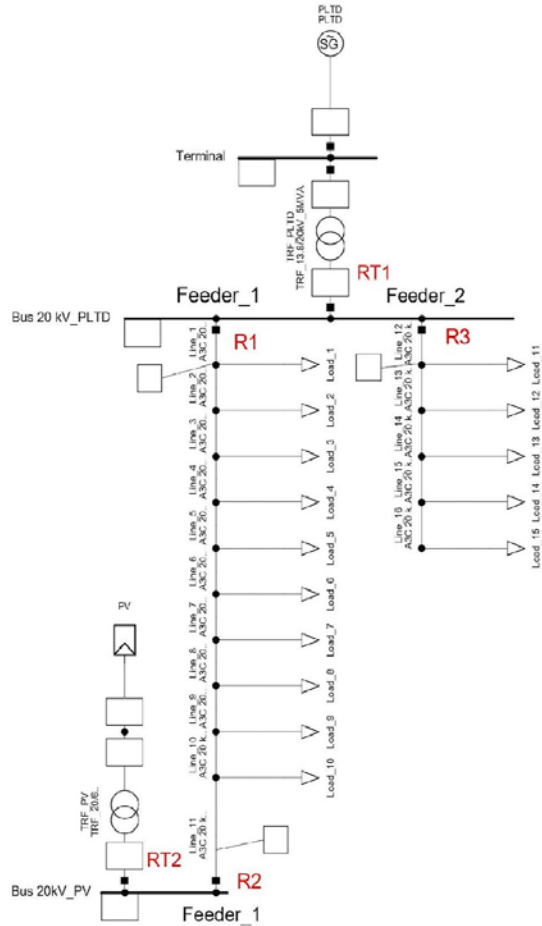


Gambar 2. Diagram alir koordinasi proteksi 51V

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Single Line Diagram Sistem Microgrid Sederhana

Terdapat 5 lokasi rele yang diuji dan ditunjukkan oleh RT1, RT2, R1, R2, dan R3 pada gambar 3. RT1 merupakan rele trafo PLTD pada sisi HV, sedangkan RT2 merupakan rele trafo PV pada sisi HV. R1 dan R2 adalah rele di pangkal penyulang 1, sedangkan R3 adalah rele di pangkal penyulang 2. Rele yang dirancang adalah rele arus lebih fasa dan ground fault relay.



Gambar 3. SLD sistem microgrid sederhana

#### B. Analisis Aliran Daya

TABEL II  
DATA ARUS DARI ANALISIS ALIRAN DAYA

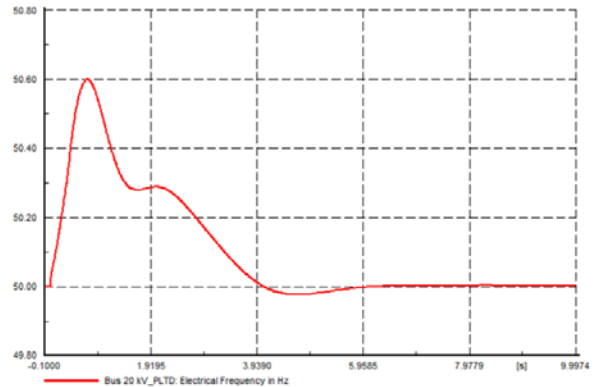
	Arus beban normal (kA)				
	RT1	RT2	R1	R2	R3
100%_PLTD	0.108*	0	0.072*	0	0.036*
100%_PV	0	0.104*	0.035	0.104*	0.035
50%_PLTD & PV	0.053	0.054	0.017	0.054	0.035

\* arus beban maksimum

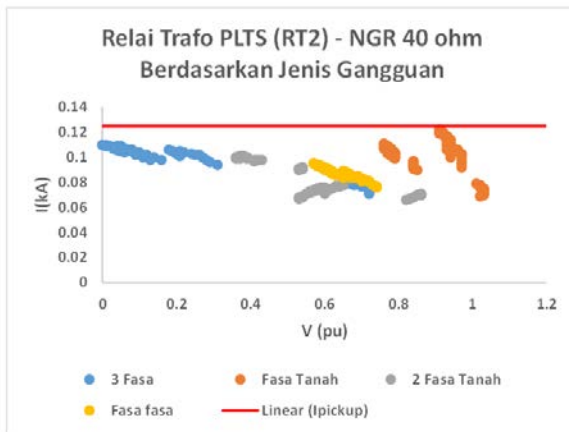
Analisis aliran daya dilakukan untuk mendapatkan data arus maksimum yang terbaca oleh CT di lokasi penempatan rele ketika sistem dalam kondisi tanpa gangguan. Data arus ini akan menjadi dasar dalam penentuan arus pickup dan CT ratio dalam perancangan sistem proteksi. Untuk sistem *microgrid* sederhana dimodelkan tiga skenario pembangkitan yaitu 100% PLTD, 100% PV, dan 50% PLTD & PV.

C. Perbandingan Performa untuk Sistem NGR dan Solidly Grounded

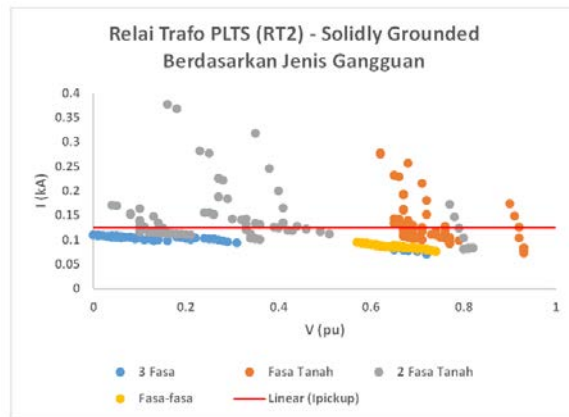
Dengan adanya NGR arus hubung singkat fasa-tanah dan 2 fasa-tanah yang terbaca rele arus lebih fasa menjadi lebih kecil. Hal ini karena NGR membatasi besar arus urutan nol saat gangguan tersebut terjadi. Dampak lainnya arus gangguan yang terbaca GFR bisa jadi lebih kecil dari arus pickup GFR yang mengakibatkan gangguan tidak terdeteksi. Selain itu, respon frekuensi saat ada gangguan hubung singkat fasa tanah dan 2 fasa tanah lebih buruk untuk sistem dengan menggunakan NGR seperti ditunjukkan oleh gambar 5. Sistem dengan NGR juga akan menambah rugi-rugi yang sebanding dengan besar resistansi NGR dan besar arus kuadrat yang melewatinya.



(b)  
Gambar 5. Respon Frekuensi (a) sistem dengan NGR 40-ohm (b) sistem dengan solidly grounded



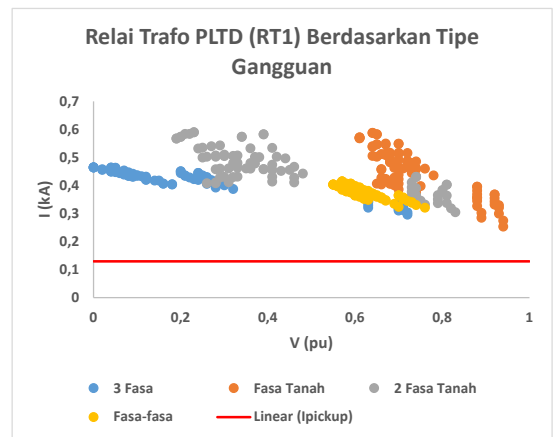
(a)



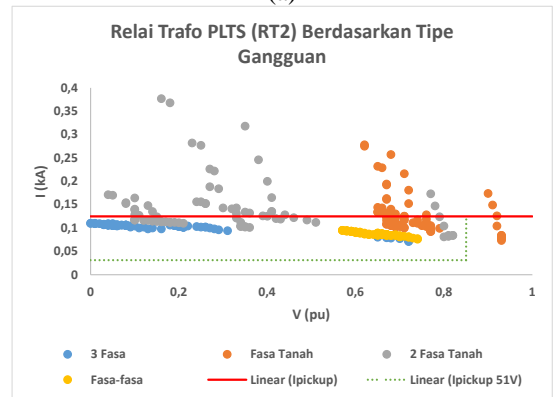
(b)

Gambar 4. Arus hubung singkat (a) sistem dengan NGR 40-ohm (b) sistem dengan solidly grounded

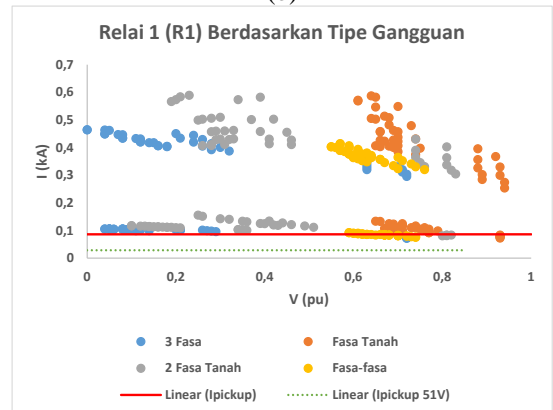
D. Setting Rele



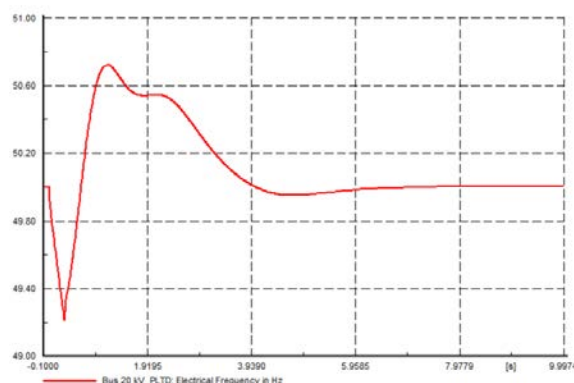
(a)



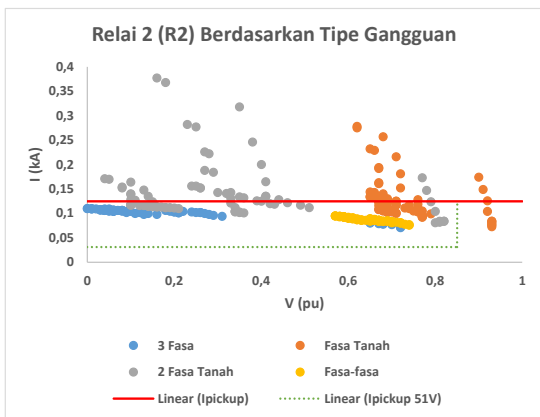
(b)



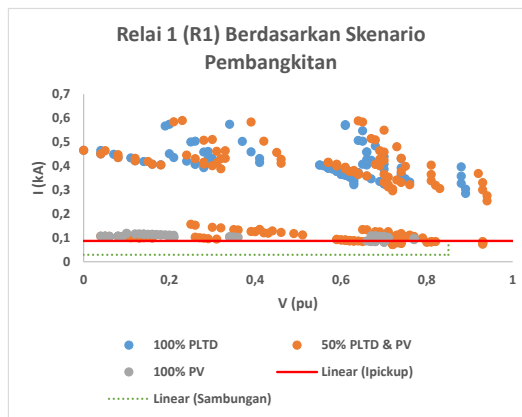
(c)



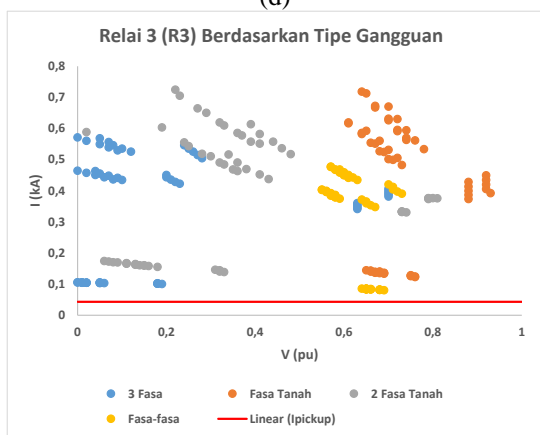
(a)



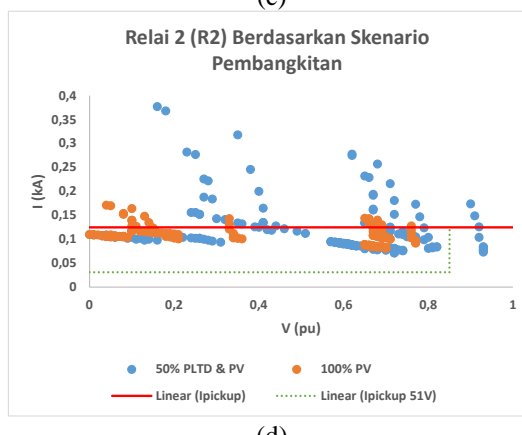
(d)



(c)

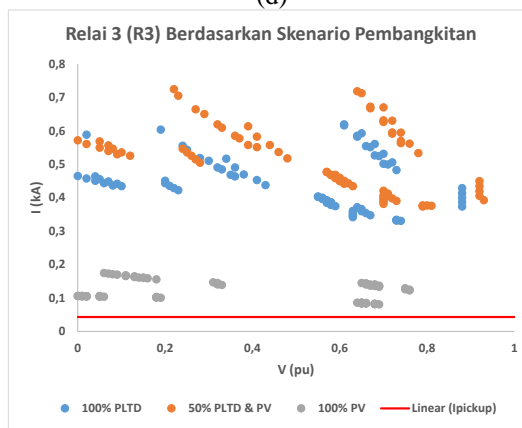


(e)

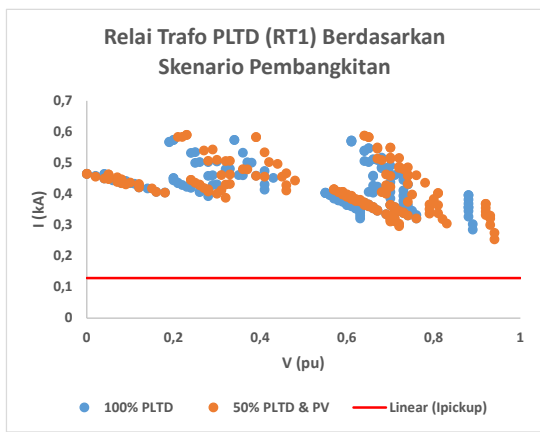


(d)

Gambar 6. Arus dan tegangan hubung singkat berdasarkan tipe gangguan (a) di rele trafo PLTD (b) di rele trafo PLTS (c) di rele 1 (d) rele 2 (e) rele 3

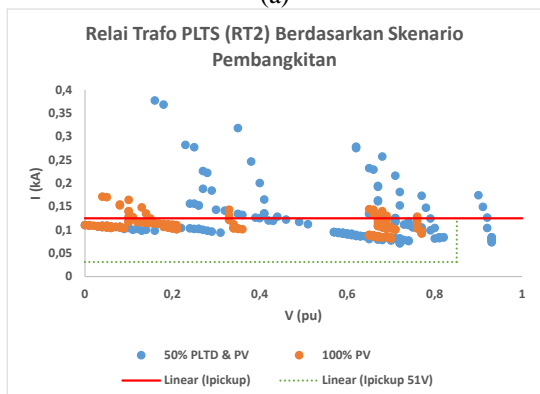


(e)



(a)

Gambar 7. Arus dan tegangan hubung singkat berdasarkan skenario pembangkitan (a) di rele trafo PLTD (b) di rele trafo PLTS (c) di rele 1 (d) rele 2 (e) rele 3



(b)

TABEL III  
SETTING RELE SISI HV TRAFO

	RT1	RT2
<b>CT Ratio</b>	150/5	150/5
<b>Kurva 1</b>	IEC Std Inverse	IEC Std Inverse (51V)
<b>TD/TS (s)</b>	0,09	0,17
<b>Ipickup (kA)</b>	0,13	0,032
<b>Kurva 2</b>	Definite Time	IEC Very Inverse
<b>TD/TS (s)</b>	0,25	0,08
<b>Ipickup (kA)</b>	0,54	0,125

TABEL IV  
WAKTU TRIP RELE SISI HV TRAFU

Gangguan	$t_{trip}(s)$	
	RT1	RT2
3 Fasa	0,49 – 0,76	0,95 – 1,48
Fasa-Tanah	0,25 – 0,93	0,54 – 1,43
2 Fasa -Tanah	0,25 – 0,73	0,47 – 1,27
Fasa - Fasa	0,54 – 0,69	1,08 – 1,27

TABEL V  
SETTING RELE PENYULANG SATU DAN PENYULANG DUA

CT Ratio	R1	R2	R3
	100/5	150/5	100/5
<b>Kurva 1</b>	IEC Std Inverse (51V)	IEC Std Inverse (51V)	IEC Short Time Inverse
<b>TD/TS (s)</b>	0,07	0,11	0,13
<b>I<sub>pickup</sub> (kA)</b>	0,029	0,032	0,043
<b>Kurva 2</b>	IEC Std Inverse	IEC Very Inverse	Definite Time
<b>TD/TS (s)</b>	0,05	0,05	0,1
<b>I<sub>pickup</sub> (kA)</b>	0,087	0,125	0,18
<b>Kurva 3</b>	Definite Time		
<b>TD/TS (s)</b>	0,1		
<b>I<sub>pickup</sub> (kA)</b>	0,36		

TABEL VI  
WAKTU RELE PENYULANG SATU DAN PENYULANG DUA

Gangguan	$t_{trip}(s)$		
	R1	R2	R3
3 Fasa	0,10 – 0,54	0,62 – 0,96	0,10 – 0,19
Fasa-Tanah	0,10 – 0,53	0,35 – 0,93	0,10 – 0,15
2 Fasa -Tanah	0,10 – 0,47	0,30 – 0,82	0,10 – 0,14
Fasa - Fasa	0,10 – 0,50	0,70 – 0,82	0,10 – 0,25

Terkait Rele Trafo PLTD dan Rele 3, dapat dilihat bahwa semua arus gangguan di atas arus *pickup* rele arus lebih fasa konvensional sehingga tidak dibutuhkan rele 51V dan GFR. Rentang waktu trip rele arus lebih fasa untuk berbagai jenis gangguan sudah di bawah 1 detik.

Untuk Rele Trafo PLTS, Rele 1, dan Rele 2 sebagian arus gangguan di bawah arus *pickup* rele arus lebih fasa konvensional sehingga dibutuhkan rele 51V. Tegangan ambang batas supaya rele 51V dapat bekerja adalah 0.85 pu, namun terlihat bahwa terdapat gangguan fasa tanah yang memiliki tegangan di atas 0.85 pu sehingga dibutuhkan GFR. Untuk waktu trip rele trafo PLTS di atas 1 detik karena arus gangguan kontribusi dari *inverter* kecil dan rele trafo PLTS perlu memastikan delay antar subsequent rele pada angka yang diizinkan, yaitu minimal 150ms. Sehingga saat ada gangguan di penyulang 2 waktu trip dari trafo PLTS menjadi cukup besar.

E. Koordinasi rele arus lebih fasa

TABEL VII  
KOORDINASI RT1 DAN R3

Jenis Gangguan dan Operasi	$t_{trip}(s)$			$\Delta t(s)$
	RT1	R3		
3 Fasa 100% PLTD	0,488	0,100	0,388	
3 Fasa 50% PLTD	0,488	0,100	0,388	
Fasa Tanah 100% PLTD	0,250	0,100	0,150	

Fasa Tanah 50% PLTD	0,250	0,100	0,150
2 Fasa Tanah 100% PLTD	0,250	0,100	0,150
2 Fasa Tanah 50% PLTD	0,250	0,100	0,150
Fasa-fasa 100% PLTD	0,549	0,100	0,449
Fasa-fasa 50% PLTD	0,536	0,100	0,436

TABEL VIII  
KOORDINASI RT1 DAN R1

Jenis Gangguan dan Operasi	$t_{trip}(s)$		$\Delta t(s)$
	RT1	R1	
3 Fasa 100% PLTD	0,488	0,100	0,388
3 Fasa 50% PLTD	0,488	0,100	0,388
Fasa Tanah 100% PLTD	0,250	0,100	0,150
Fasa Tanah 50% PLTD	0,250	0,100	0,150
2 Fasa Tanah 100% PLTD	0,250	0,100	0,150
2 Fasa Tanah 50% PLTD	0,250	0,100	0,150
Fasa-fasa 100% PLTD	0,549	0,100	0,449
Fasa-fasa 50% PLTD	0,536	0,100	0,436

TABEL IX  
KOORDINASI R1, R2, DAN R3

Jenis Gangguan dan Operasi	$t_{trip}(s)$			$t_{trip}(s)$			$\Delta t(s)$
	R1	R3	$\Delta t(s)$	R2	R1	$\Delta t(s)$	
3 Fasa 50% PV	0.373	0.100	0.273	0.635	0.373	0.262	
3 Fasa 100% PV	0.373	0.177	0.196	0.635	0.373	0.262	
Fasa Tanah 50% PV	0.315	0.100	0.215	0.530	0.315	0.215	
Fasa Tanah 100% PV	0.368	0.130	0.237	0.625	0.368	0.258	
2 Fasa Tanah 50% PV	0.286	0.100	0.186	0.478	0.286	0.192	
2 Fasa Tanah 100% PV	0.344	0.113	0.232	0.582	0.344	0.238	
Fasa-fasa 50% PV	0.416	0.100	0.316	0.714	0.416	0.298	
Fasa-fasa 100% PV	0.446	0.231	0.215	0.771	0.446	0.325	

TABEL X  
KOORDINASI RT2 DAN R2

Jenis Gangguan dan Operasi	$t_{trip}(s)$		$\Delta t(s)$
	RT2	R2	
3 Fasa 50% PV	0.952	0.616	0.336
3 Fasa 100% PV	0.952	0.616	0.336
Fasa Tanah 50% PV	0.539	0.349	0.190
Fasa Tanah 100% PV	0.779	0.504	0.275
2 Fasa Tanah 50% PV	0.471	0.305	0.166
2 Fasa Tanah 100% PV	0.698	0.452	0.246
Fasa-fasa 50% PV	1.082	0.700	0.382
Fasa-fasa 100% PV	1.151	0.745	0.406

Koordinasi proteksi dilakukan untuk mendiskriminasi kerja antar rele. Waktu tunda untuk *subsequent* rele dipastikan minimal 150ms supaya tidak ada 2 rele atau lebih yang bekerja secara bersamaan. Dipastikan juga waktu *trip* dari rele optimal dengan memilih, arus *pickup* dan jenis waktu tunda kurva karakteristik invers yang sesuai.

F. Koordinasi GFR

TABEL XI  
RENTANG ARUS URUTAN NOL YANG MENGALIR SAAT HUBUNG SINGKAT

		GFR Trafo PLTS	GFR 1	GFR 2
Fasa	$3 \times I_0 \text{ max (kA)}$	0.699	0.719	0.699
Tanah	$3 \times I_0 \text{ min (kA)}$	0.123	0.124	0.123
2 Fasa	$3 \times I_0 \text{ max (kA)}$	1.121	1.068	1.121
Tanah	$3 \times I_0 \text{ min (kA)}$	0.221	0.226	0.221

TABEL XII  
KOORDINASI GFR SISTEM MICROGRID SEDERHANA

	GFR Trafo PLTS	GFR 2	GFR 1
CT Ratio	150/5	150/5	100/5
Kurva	Definite Time	Definite Time	Definite Time
Time Setting (s)	0.6	0.45	0.3
Ipickup (kA)	0.03	0.03	0.02

Koordinasi GFR penting untuk dilakukan karena terdapat beberapa arus hubung singkat fasa tanah dan 2 fasa tanah yang tidak dapat dideteksi oleh rele arus lebih fasa konvensional dan rele 51V. Besar arus pickup dari GFR ini bernilai 25-30% arus beban maksimum. Dapat dilihat bahwa 3 kali arus urutan nol diatas arus pickup GFR sehingga dapat dipastikan bahwa gangguan fasa tanah dan 2 fasa tanah dapat dideteksi oleh GFR. Delay subsequent rele juga dipastikan minimal 150 ms sehingga koordinasi rele dapat dilakukan dengan baik.

IV. KESIMPULAN

Artikel ilmiah ini telah memaparkan perancangan rele arus lebih yang bisa mendeteksi arus gangguan yang kecil di sistem microgrid berbasis inverter dengan menggunakan rele arus lebih dengan masukan tambahan tegangan (51V).

Dari studi yang telah dilakukan, hasil mengindikasikan

bahwa rele 51 V dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengatasi masalah tidak sensitifnya OCR untuk arus gangguan kecil di sistem microgrid berbasis inverter. Kemudian, perlu dilakukan koordinasi proteksi yang untuk memastikan delay dari subsequent relay minimal 150 ms untuk menghindari 2 rele memberikan perintah trip bersamaan. Hal ini terbukti dapat dilakukan. Terakhir, untuk sistem microgrid berbasis inverter, lebih baik agar netral trafo ditanahkan secara solidly grounded dibanding dengan NGR untuk mempermudah identifikasi gangguan tanah. Selain itu, kesimpulan ini juga didukung fakta bahwa arus hubung singkat pada system berbasis inverter tidak tinggi sehingga sistem pengetanahan langsung tidak memberikan stress yang tinggi pada peralatan.

REFERENCES

- [1] BPS, "Statistik Indonesia 2021," Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, Jakarta, 2021.
- [2] Pratiwi, I. " Realisasi Bauran EBT Capai 13,55 Persen Hingga April 2021," Repunlikas, 04 Juni 2021. [Online]. Available: <https://www.republika.co.id>. [Accessed 22 September 2021].
- [3] International Energy Agency, "Renewables 2019 – Analysis and forecast to 2024," 2019.
- [4] I. Kim, "Short-Circuit Analysis Models for Unbalanced Inverter-Based Distributed Generation Sources and Loads," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 5, pp. 3515-3526, 2019.
- [5] H. Muda and P. Jena, "Real time simulation of new adaptive overcurrent technique for microgrid protection," 2016 National Power Systems Conference (NPSC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/NPSC.2016.7858897.
- [6] P. Mishra, A. K. Pradhan and P. Bajpai, "Adaptive Voltage Restrained Overcurrent Relaying for Protection of Distribution System with PV Plant," 2021 9th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS), pp. 1-5, 2021.
- [7] "HYPERSIM User Documentation," OPAL-RT TECHNOLOGIES, [Online]. Available: <https://wiki.opal-rt.com>. [Accessed 31 January 2022].