

Analisis Pengaruh Variasi *Photovoltaic* Terhadap Sistem Proteksi di Instalasi Listrik Pabrik Pengolahan Garam

Afeef Kurnia Rahmawan^{1*}, Mochammad Facta², Enta Akhmad Ramadhan³

¹Prodi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang, Indonesia

²Departemen Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

³Prodi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Jendral Soedirman, Purwokerto, Indonesia

*Email: afeefkurniarahman@upgris.ac.id

Received on 24-04-2025 | Revised on 01-05-2025 | Accepted on 25-06-2025

Abstrak—Penggunaan energi terbarukan seperti Photovoltaic (PV) semakin meningkat untuk mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit yang membutuhkan bahan bakar fosil. Namun integrasi PV pada beban yang disuplai oleh PLN menggunakan jaringan distribusi tegangan menengah (JTM) dapat mempengaruhi selektivitas proteksi di sisi beban, terutama saat kondisi irradiansi tinggi. Tujuan dari penelitian ini menganalisis perubahan koordinasi sistem proteksi yang terdampak oleh PV pada beban motor di Pabrik pengolahan Garam. Variasi daya PLTS 12kW hingga 27 kW digunakan untuk percobaan agar dapat perbandingan dampak saat PV eksisting 4kW dan kemungkinan pengembangan. Software bantu untuk menunjang penelitian ini dengan menggunakan ETAP. Mode Load Flow, Static Motor Starting dan Star – Protective Device Coordination digunakan dalam penelitian ini berkaitan beban yang digunakan adalah motor induksi. Hasil yang didapat menunjukkan kenaikan tegangan pada kondisi starting motor dengan kapasitas PLTS 12 kW sebesar 69,42 Volt dan perlu penggantian gawai proteksi dari 63 Ampere menjadi 125 Ampere agar sistem lebih optimal.

Kata kunci: Pemodelan, Proteksi, Tegangan

Abstrak— The growing use of renewable energy sources like Photovoltaic (PV) is intended to lessen dependence on power generation from fossil fuels. However, PV integration into loads supplied by medium voltage distribution networks (MV) may affect protection selectivity, particularly under high irradiation conditions. This study analyzes the impact of PV variation on the protection coordination of motor loads at a salt processing plant. A range of PV capacities from 12 kW to 27 kW is examined to compare with the existing 4 kW system and assess the effect of future expansion. The simulation is conducted using ETAP software. The Load Flow, Static Motor Starting, and Star – Protective Device Coordination analysis modes are employed in this study, considering that the primary load consists of induction motors. The results show a voltage increase of 69.42 Volts during motor starting conditions with a 12 kW PV capacity. Additionally, replacement of the protection device from 63 Amperes to 125 Amperes is required to optimize system performance

Keywords: Modelling, Protection, Voltage

I. PENDAHULUAN

PENGUNAAN energi semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan meningkatnya aktivitas masyarakat dalam upaya meningkatkan kualitas hidup. Salah satu contohnya adalah dengan membuka berbagai jenis usaha, yang umumnya memerlukan penggunaan energi listrik, seperti pabrik atau unit usaha berskala kecil. Kapasitas PLTS tumbuh subur hingga 238 GW dibandingkan di tahun sebelumnya [1]. Energi Baru Terbarukan (EBT) di Indonesia pun sudah mulai dikembangkan untuk tempat usaha mereka, meskipun tetap terintegrasi oleh jaringan PLN. Penggunaan PV ini tidak hanya berpotensi menghasilkan manfaat ekonomi, tetapi juga keunggulan dalam aspek kelistrikan dan lingkungan, salah satu contohnya dengan memanfaatkan fotovoltaik atap (PV) secara maksimal, dikombinasikan dengan kendaraan listrik (EV) dengan pengisian dua arah untuk penyimpanan energi [2] [3]. Namun demikian, karena kapasitas instalasi PV meningkat, penambahan PV 40 % terhadap jaringan listrik dapat menyebabkan tegangan lebih [4]. Untuk menangani pelanggaran tegangan baik di jaringan distribusi 20kV atau di tegangan rendah 200-220 V dengan pengaturan *on-load tap changer* (OLTC) dan sistem penyimpanan energi baterai (ESS) [5]. Adapun penambahan PV ini juga dapat menangani susut tegangan menggunakan kapasitas 6 kWp [6] dan kasus lain menyebabkan *overvoltage* tergantung dari jarak PV tersebut terpasang terhadap beban [7]. Dalam pemasangan PV juga berdampak pada setting waktu proteksi di JTM sehingga *Over Current Rele* (OCR) trip lebih cepat di 0,031s dan 0,0121s di mode 3 phase menjadi 0,199s dan 0,121s [8].

Tujuan untuk mengamati serta menganalisis koordinasi sistem proteksi pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) yang dipengaruhi oleh adanya injeksi daya dari sistem PV. Salah satu

cara di penelitian sebelumnya dengan mensetting ulang gawai proteksi sesuai karakteristik *trip device* [9], penggunaan relay 51V juga dipilih karena lebih sensitif terhadap penurunan tegangan, serta evaluasi *Neutral Grounding Resistor* (NGR) terhadap koordinasi proteksi [10]. Kondisi stabilitas transient karena dampak PV on grid juga berpengaruh terhadap kualitas daya yang diterima. Kondisi penempatan PV harus diperhitungkan guna menjaga peningkatan harmonisa yang ada di jaringan distribusi, batas yang diperlukan sesuai IEEE-519 adalah 3% untuk harmonik individu dan 5% untuk distorsi harmonik total THD (%) untuk bus dengan tegangan antara 1kV dan 69kV. Selain itu, persyaratan untuk bus dengan tegangan lebih tinggi dari 161 kV adalah 1% untuk harmonik individual dan 1,5% untuk THD [11], [12]. Survey yang sudah dilakukan, lokasi PLTS adalah industri yang bergerak di pengolahan garam mempunyai kapasitas 4 kiliowattpeak (kWp). PLTS ini juga menerapkan sistem *ongrid*, jadi apabila beroperasi penyaluran dayanya dibagi menjadi 3 (tiga), yakni digunakan pada beban pabrik dan disalurkan ke jaringan PLN. Dalam lingkup pengujiannya, penelitian ini menggunakan skenario keadaan pembebanan minimum dan maksimum yang ada di JTM lalu untuk sisi JTR dilakukan variasi PLTS berkapasitas 12 kW hingga 27kW. Software penunjang yang dipilih untuk memodelkan sistem eksisting menggunakan ETAP 12.6 [13].

Hasil penelitian untuk mode *Static Motor Starting* saat 0,1 detik, variasi PLTS 12kW hingga 27kW dapat menaikkan nominal tegangan saat *starting* motor sehingga tegangan tidak jatuh diatas 20 % sesuai standar IEEE 3002-7/D9 serta terdapat rekomendasi pemilihan gawai proteksi dengan melihat waktu *trip delay*.

Penelitian ini menghadirkan pembaruan dengan menyajikan perbandingan kuantitatif antara hasil perhitungan manual dan simulasi ETAP, yang jarang ditemukan dalam studi sebelumnya. Selain itu, evaluasi koordinasi proteksi dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan pengaruh PV dan kondisi beban puncak. Penekanan pada analisis ketahanan sistem terhadap lonjakan arus dalam selang waktu 0,1 detik.

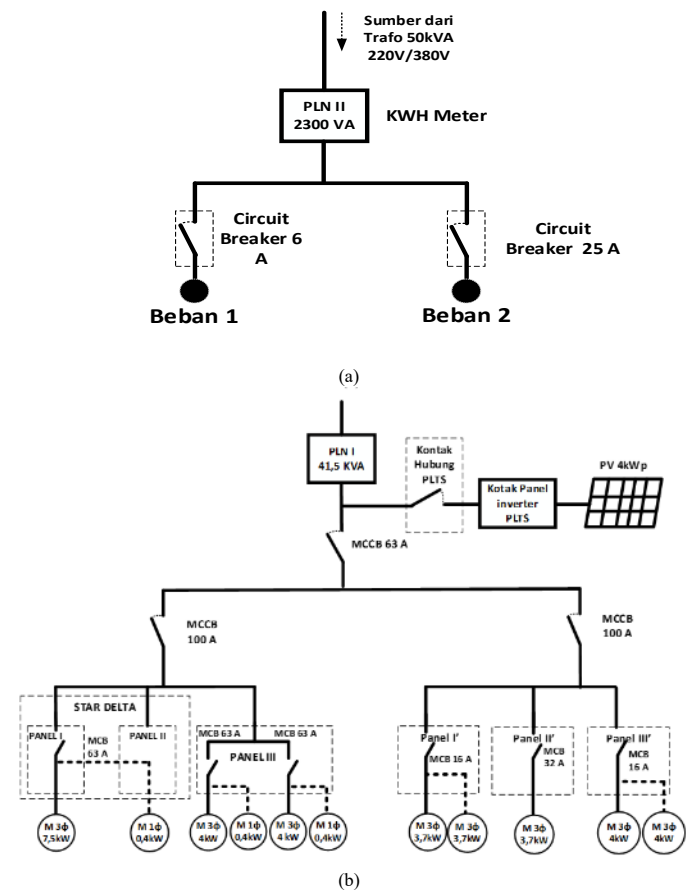
II. METODE

A. Studi Literatur

Kajian literatur dengan menelaah berbagai tulisan ilmiah baik dari dalam maupun luar negeri, guna memahami sejauh mana penelitian terkait topik ini telah berkembang dan dapat dikembangkan lebih lanjut.

B. Pengamatan dan Pengambilan Data

Single Line Diagram Pabrik UD Garam Cemerlang



Gambar 1. (a) Single Line Langganan I, (b) Single Line Langganan II

Pada Gambar 1. merupakan *single line* kelistrikan pabrik garam dimana mempunyai 2 (dua) langganan PLN yakni 2300 VA (gambar 1. (a)) digunakan untuk penerangan dan 41,5 kVA untuk motor induksi sebagai penggerak mesin produksi. PLTS on grid kapasitas 4kW hanya menyalurkan energi pada langganan 41500 VA saja untuk keperluan produksi garam seperti pada Gambar (1. (b)). Untuk konfigurasi singkat dari instalasi listrik menuju mesin produksi yang menjadi topik utama pada penelitian ini dimulai dari kWh meter PLN menuju ke MCCB utama 63A lalu masuk ke MCCB pembagi yang masing masing 100 A. MCCB 100 A pertama menuju ke 6 (enam) buah motor induksi lalu yang MCCB 100 A kedua menuju ke 5 (lima) motor induksi. Kapasitas dari motor tersebut bermacam macam mulai dari 0,4 kW hingga 7,5 kW. Konfigurasi *starting* dari masing - masing motor ada 2 (dua) macam yakni secara *direct online* (DOL) dan *Star Delta*. Dimana metode DOL dihubungkan langsung dengan sumber tetapi untuk metode *Star Delta* menggunakan konfigurasi (weye) untuk mengurangi arus *starting*) [14].

C. Modul Surya



Gambar 2. Modul Panel Surya

Modul Surya UD Garam Cemerlang berkapasitas 4kWp berjenis *Monocrystalline*, dengan masing – masing modul berkapasitas 335 Wp, modul disusun secara seri sebanyak 6 Buah, sedangkan jumlah string sebanyak 2 (dua) strings. Sistem penyangga PLTS dipilih penyangga tetap (*fixed mounting system*) karena untuk dampak lingkungan pun tidak menggunakan energi tambahan selama masa pakai dan lebih sedikit material logam yang digunakan [15]. Kemiringan dan orientasi panel pada umumnya disesuaikan dengan lokasi pemasangan PLTS. Sudut kemiringan ditetapkan mengikuti arah datangnya sinar matahari, yaitu sebesar 25 derajat.

D. Inverter

Inverter yang digunakan pada PLTS ini menggunakan manufaktur SOFAR SOLAR tipe HYD 6KTL – 3PH dengan daya keluaran maksimal 6kW [16].



Gambar 3. Inverter SofarSolar 6KTL- 3PH [16]

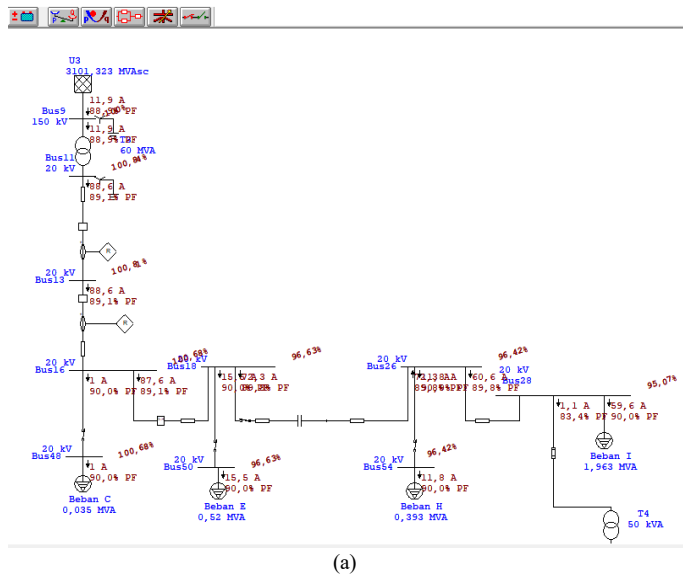
TABEL I
NAMEPLATE INVERTER SOFAR SOLAR 6KTL-3PH

<i>Datasheet</i>	<i>HYD 6KTL- 3PH</i>
Input Baterai	
Rentang Tegangan Baterai pada Beban Penuh	240 – 800 V
Data Input String PV	
Daya Maksimal Input PV	9000Wp (6600Wp/6600Wp)
Tegangan DC Maksimum	1000 V
Rentang Tegangan MPPT	180 – 960 V
Tegangan DC Nominal	600 V
Data Output AC (Tersambung ke Jaringan)	
Daya Maksimum Output AC ke Jaringan Listrik	6600 VA
Rentang Tegangan Operasional	184Vac – 276 Vac
Rentang Frekuensi	50/60 Hz
Faktor Daya	(0,8 leading to 0,8 lagging)
total Harmonic Distortion Arus Output (THDi)	<3%

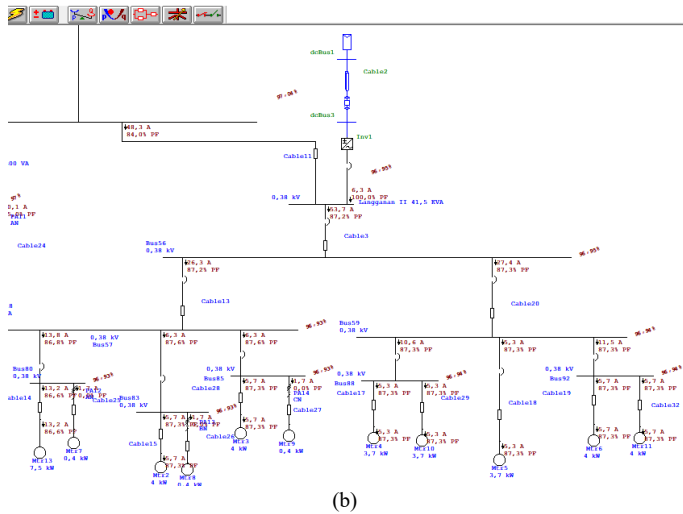
Pada Tabel I. merupakan *nameplate* dari inverter HYD 6KTL-3PH yang mempunyai dimensi 571,4*515*264 I mm, berat 33 kg dengan operasi temperature antara -30 sampai 60°C dengan proteksi IP65 yang tahan terhadap debu dan percikan air. Inverter ini memiliki masukan daya maksimal dari PV mencapai 9000 Wp (6600 Wp/600Wp) dengan maksimal tegangan 1000V frekuensi 50/60 Hz. Range tegangan MPPT antara 180 – 960 V. AC Output THDi pada inverter ini <3%.

E. Adaptive Newton Raphson

Percobaan menggunakan Metode *Adaptive Newton - Raphson* bertujuan untuk mengolah data mentah yang didapatkan pada objek penelitian [17], seperti data Waktu Beban Puncak (WBP) pada sisi jaringan 20kV lalu pembebanan di sisi tegangan rendah dan kapasitas PV yang terpasang.



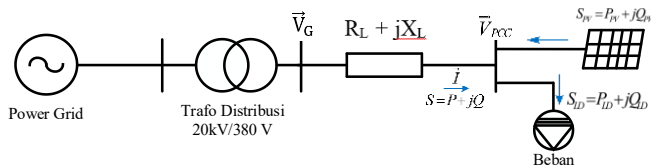
(a)



(b)

Gambar 4. (a) Load Flow sisi TM (b) Load Flow sisi TR

Analisis hubungan untuk membuktikan bahwa peran PV dapat menaikkan tegangan dibuktikan dengan Gambar 5. dibawah ini :



Gambar 5. Sistem 2- Bus untuk menjelaskan persamaan tegangan

Pada sistem 2 (dua) bus di gambar digunakan untuk melihat tegangan pada awal dan akhir jaringan distribusi yang terdampak oleh PV, dimana V_{pcc} adalah tegangan pada titik sambungan, V_G adalah tegangan pada Trafo, $R_L + jX_L$ adalah impedansi kabel, I adalah arus pada jaringan. S adalah daya semu dari jaringan ke Bus, S_{PV} daya semu dari PV dan S_{LD} adalah konsumsi beban [18]. Apabila PV lebih besar pembangkitan dari beban konsumsi di titik PCC, jaringan akan

menyerap daya. Tetapi jika PV membangkitkan listrik kurang dari konsumsi beban pada titik PCC, grid menyuplai daya ke beban,

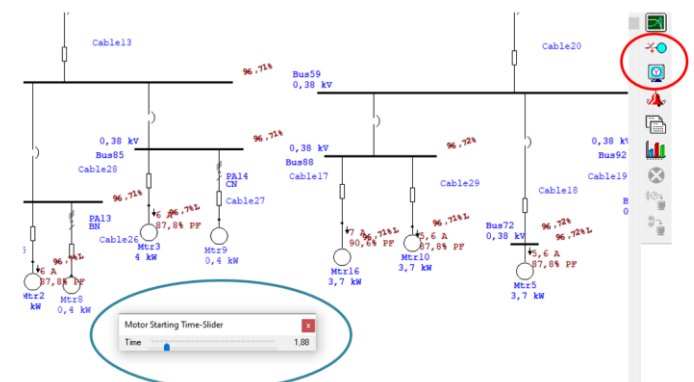
$$S = V I \quad (1)$$

$$\vec{I} = \frac{P - jQ}{\vec{V}_{pcc}} \quad (2)$$

$$\vec{V}_G = \vec{V}_{pcc} + \vec{I} (R_L + jX_L) \quad (3)$$

$$\vec{V}_{pcc} = \vec{V}_G - \left[\frac{PR_L + QX_L}{V_{pcc}^2} - j \frac{R_L Q + PX_L}{V_{pcc}^2} \right] \quad (4)$$

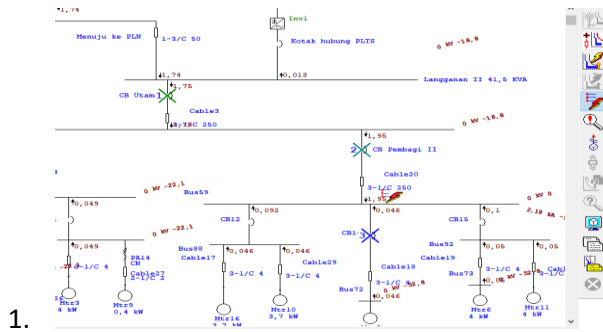
Setelah itu dilakukan uji *starting* motor, dimana dalam mode tersebut dapat diamati tegangan dan arus yang akan dikonsumsi oleh beban motor dengan range 1 sampai 15 detik hingga motor itu *steady state*.

Gambar 6. Simulasi ETAP pada kondisi *Motor Starting*

Pada lingkaran merah merupakan fitur yang dimiliki ETAP untuk mensimulasikan *motor starting* dengan *range* waktu yang bisa ditentukan tentukan seperti pada lingkaran biru. Penelitian menggunakan jenis motor induksi sesuai dengan yang ada pabrik pengolahan garam tersebut. Masing – masing motor mempunyai kapasitas 7,5 kW, 3,7 kW, 4 kW dan 0,4 kW dan menggunakan standar IEEE 3002-7/D9 [19]

F. Protective Device Coordination

Protective Device Coordination ini bertujuan untuk menghitung arus gangguan pada sistem dan mengevaluasi koordinasi proteksi yang ada pada sistem jaringan tegangan rendah sebelum dan sesudah terdampak PV [20].

Gambar 7. Simulasi ETAP percobaan *Short Circuit Analysis*

Pada gambar 7. terlihat perubahan posisi *Circuit Breaker* dari “close” menjadi “open” di simbolkan dengan tanda “X” dengan urutan waktu tertentu, Peneliti menggunakan *rating* CB dan pabrikan semirip mungkin dengan kondisi eksisting yang ada di lapangan. Analisis yang dilakukan berupa kurva *trip* CB dimana kurva ini menjelaskan hubungan antara arus hubung singkat dan waktu *trip* CB. Beberapa percobaan yang digunakan adalah:

1. Kondisi WBP pada JTM, beban penuh pada JTR dan penambahan PLTS kapasitas 4kW (eksisting)
2. Kondisi WBP pada JTM, beban penuh pada JTR dan penambahan variasi PLTS 12 kW hingga 27 kW.

Pada tiga percobaan tersebut digunakan untuk rekomendasi pemilihan gawai proteksi dengan melihat waktu *trip* delay.

III. HASIL DAN DISKUSI

Kondisi awal pengujian dengan mensimulasikan saat beban di jaringan tegangan rendah mengalami kondisi *steady state* menggunakan metode *Adaptive Newton - Raphson* dan selanjutnya diuji dengan kondisi *starting* motor induksi pada range waktu 1 sampai 15 detik. Dengan menggunakan rumus (4) kondisi Waktu Beban Puncak (WBP) diperoleh:

A. Kondisi WBP sebelum diberikan PV

$$V_G = 0,365 \text{ kV}$$

$$S_{3L} = 34 \text{ kVA}$$

$$V_{LL} = 0,364 \text{ kV}$$

$$R_L + jX_L = 0,712 + j0,093$$

$$V_{pcc} = ?$$

$$V_{pcc} = V_G - \left(\frac{S_{3L}}{V_{LL}} \right) R_L + jX_L$$

$$0,365 - \left[\left(\frac{34}{0,364} \right) 0,712 + j0,093 \right]$$

$$0,365 - \left[\left(\frac{34}{0,364} \right) 0,712 + j0,093 \right]$$

$$0,365 - (93,4) 0,712 + j0,093]$$

$$0,368 - (66,5 + j8,686)$$

$$368 - 66,5 - j8,686)$$

$$301,5 \text{ V} - j8,686$$

$$301,6 \text{ V} \angle -1,650$$

B. Kondisi WBP sesudah diberikan PV

$$V_G = 0,366 \text{ kV}$$

$$S_{3L} = 34 \text{ kVA}$$

$$S_{3PV} = 4 \text{ kVA}$$

$$V_{LL} = 0,366 \text{ kV}$$

$$R_L + jX_L = 0,712 + j0,093$$

$$V_{pcc} = ?$$

$$V_G - \left(\frac{S_{3L} - S_{3PV}}{V_{LL}} \right) R_L + jX_L$$

$$0,366 - \left[\left(\frac{34 - 4}{0,366} \right) 0,712 + j0,093 \right]$$

$$0,366 - \left[\left(\frac{30}{0,366} \right) 0,712 + j0,093 \right]$$

$$0,366 - (81,96) 0,712 + j0,093]$$

$$0,366 - (58,35 + j7,62)$$

$$366 - 58,35 - j7,62$$

$$307,65 - j7,62$$

$$307,74 \text{ V} \angle -1,418$$

Dengan menggunakan rumus tersebut dapat membuktikan bahwa ada kenaikan tegangan pada sisi V_{pcc} kondisi WBP variasi PLTS 4kW. Ragam kapasitas PLTS serta perbandingan antara hasil perhitungan dan simulasi menggunakan ETAP dapat ditemukan pada Tabel II berikut.

TABEL II.
PERBANDINGAN TEGANGAN DAN SUDUT ANTARA PERHITUNGAN MANUAL DAN SIMULASI ETAP KONDISI WBP

Variasi Kapasitas PLTS (kW)	Tegangan (V) dan sudut (°) kondisi WBP dengan Rumus	Tegangan (V) dan sudut (°) kondisi WBP di ETAP
0 (tidak ada)	301,6 \angle -1,650	364 \angle -3,30
4	307,74 \angle -1,418	365,3 \angle -3,11
12	324,36 \angle -0,983	367,1 \angle -2,74
20	342 \angle -0,589	368,9 \angle -2,38
27	356,53 \angle -0,281	370,4 \angle -2,06

Terdapat selisih 62,4 Volt (WBP) pada kondisi sebelum terdampak PV dan selisih dengan rentan 13,87 Volt hingga 57,56 Volt (WBP). Hal ini dikarenakan metode perhitungan *Load Flow* ETAP menggunakan *Adaptive Newton Raphson* sehingga hasil tidak sama persis dengan perhitungan, tetapi untuk Analisa kenaikan tegangan saat diberikan PV dengan rentan 4 hingga 27 kW baik dari perhitungan maupun dari simulasi adalah benar, tegangan (V_{pcc}) beranjak naik seiring kenaikan kapasitas PV yang diberikan pada sistem.

Hail ini sesuai dengan teori dasar aliran daya dan peran *distributed generation* dalam mendukung kestabilan sistem distribusi. Fenomena ini juga memperkuat pemahaman bahwa integrasi energi terbarukan tidak hanya berdampak pada sisi energi, tetapi juga pada performa teknis sistem tenaga. Diberikan perhitungan untuk Analisa peran penambahan PV dapat menaikkan tegangan saat motor *starting* secara bersama di 0,1 detik. Dengan menggunakan rumus dibawah ini :

C. Kondisi Tegangan starting WBP sebelum diberikan PV

$$V_G = 0,300 \text{ kV}$$

$$S_{3L} = 34 \text{ kVA}$$

$$V_{LL} = 0,301 \text{ kV}$$

$$R_L + jX_L = 0,712 + j0,093$$

$$V_{pcc} = ?$$

$$V_{pcc} = V_G - \left(\frac{S_{3L}}{V_{LL}} \right) R_L + jX_L$$

$$0,300 - \left[\left(\frac{34}{0,301} \right) 0,712 + j0,093 \right]$$

$$0,300 - \left[\left(\frac{34}{0,301} \right) 0,712 + j0,093 \right]$$

$$0,300 - (112,9) 0,712 + j0,093]$$

$$0,300 - (80,42 + j10,50)$$

$$300 - 80,42 - j10,50)$$

$$219,58 \text{ V} - j10,50$$

$$219,83 \text{ V} \angle - 2,73$$

D. Kondisi Tegangan starting WBP sesudah diberikan PV

$$V_G = 0,301 \text{ kV}$$

$$S_{3L} = 34 \text{ kVA}$$

$$S_{3PV} = 4 \text{ kVA}$$

$$V_{LL} = 0,299 \text{ kV}$$

$$R_L + jX_L = 0,712 + j0,093$$

$$V_{pcc} = ?$$

$$V_G - \left(\frac{S_{3L} - S_{3PV}}{V_{LL}} \right) R_L + jX_L$$

$$0,301 - \left[\left(\frac{34 - 4}{0,299} \right) 0,712 + j0,093 \right]$$

$$0,301 - \left[\left(\frac{30}{0,299} \right) 0,712 + j0,093 \right]$$

$$0,301 - (100,33) 0,712 + j0,093]$$

$$0,301 - (71,43 + j9,33)$$

$$301 - 71,43 - j9,33$$

$$229,58 - j9,33$$

$$229,58 \text{ V} \angle - 2,232$$

Dengan menggunakan rumus tersebut dapat membuktikan bahwa ada kenaikan tegangan pada sisi V_{pcc} kondisi WBP variasi PLTS 4kW. Tabel III. berikut menyajikan variasi kapasitas PLTS serta perbandingan antara hasil perhitungan dan simulasi menggunakan ETAP.

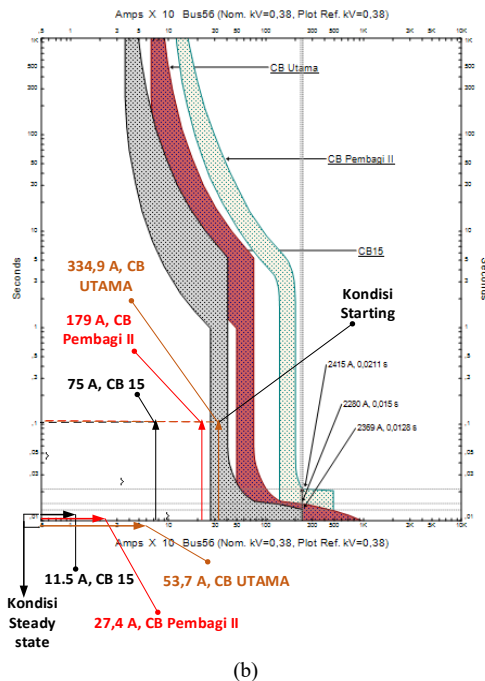
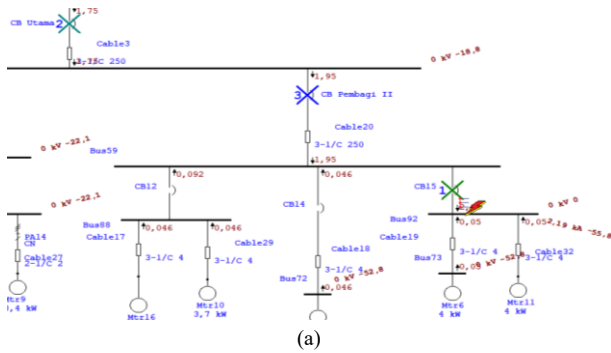
TABEL III.
PERBANDINGAN TEGANGAN ANTARA PERHITUNGAN DAN SIMULASI ETAP
KONDISI WBP

Variasi Kapasitas PLTS (kW)	Tegangan (V) kondisi WBP dengan Rumus	Tegangan (V) kondisi WBP di ETAP
0 (tidak ada)	219,83	298
4	229,58	299
12	250,06	301
20	271,14	303
27	288,61	304

Terdapat selisih 78,17 Volt (WBP) sebelum terdampak dan terdapat pula selisih dengan rentan 15,39 Volt – 69,42 Volt (WBP). Hal ini dikarenakan metode perhitungan Load Flow ETAP menggunakan *Adaptive Newton Raphson* sehingga hasil tidak sama persis dengan perhitungan, tetapi untuk Analisa kenaikan tegangan saat diberikan PV kondisi *starting* di 0,1 detik dengan PLTS rentan 4 hingga 27 kW baik dari perhitungan maupun dari simulasi adalah benar, tegangan (V_{pcc}) beranjak naik seiring kenaikan kapasitas PV yang diberikan pada sistem tersebut. *Penambahan* PLTS terbukti efektif dalam mengurangi penurunan tegangan saat *starting* motor, baik berdasarkan perhitungan manual maupun simulasi ETAP. Semakin besar kapasitas PLTS, semakin tinggi tegangan yang dipertahankan saat motor menyala serentak. Temuan ini mendukung teori bahwa PLTS dapat meningkatkan kualitas daya pada sistem distribusi, khususnya dalam mengurangi efek transien akibat *starting* beban besar.

E. Arus Hubung Singkat dan Koordinasi Proteksi kondisi *Steady State*

Percobaan saat kondisi arus hubung singkat kondisi *steady state* untuk memberikan skema koordinasi proteksi pemutusan oleh gawai proteksi secara tersruktur. Hasil yang akan ditampilkan untuk mewakili semua scenario saat sebelum dan terdampak oleh PV karena arus *starting* dan arus hubung singkat tidak jauh berbeda.

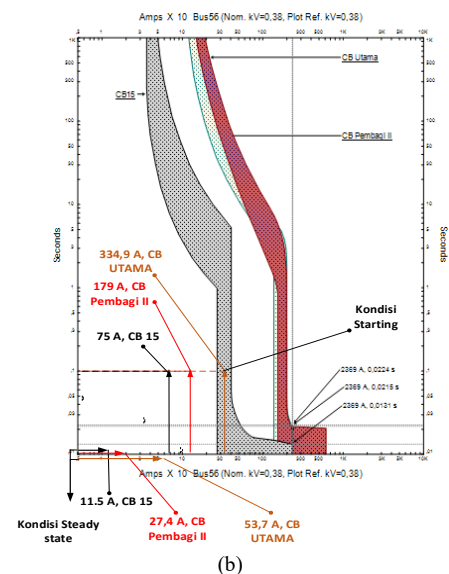
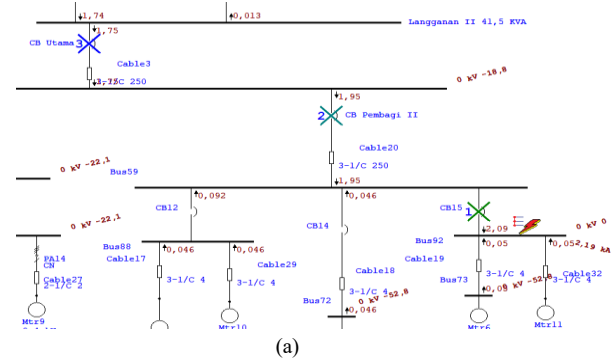
Gambar 8. (a) Pemutusan Hubung Singkat Eksisting (b) *Star-View* eksisting

abnormal ditemukan. Pada Gambar 8. (a) seharusnya CB pembagi II yang *trip* terlebih dahulu sebelum CB utama sehingga saat terjadi arus gangguan motor induksi di bagian CB pembagi I tetap berjalan dan tidak mengalami *trip*. Hal ini dibuktikan pada Gambar 8. (b) dengan kurva waktu *trip* yakni 0,0128s – 0,015s – 0,0211s. Berdasarkan kondisi abnormal tersebut dilakukan pemilihan gawai proteksi ulang berdasarkan waktu *trip* dan arus masukan [21]. Spesifikasi dari perangkat proteksi tersebut dapat ditemukan pada Tabel IV di bawah ini.

TABEL IV
PENGANTIAN GAWAI PROTEKSI

Nama CB	Kapasitas	Pabrikan	Nama CB Pengganti	Kapasitas	Pabrikan
CB Utama	63 A	Mitsubishi NF63-CV	CB Utama	125A	Mitsubishi NF 255 RB

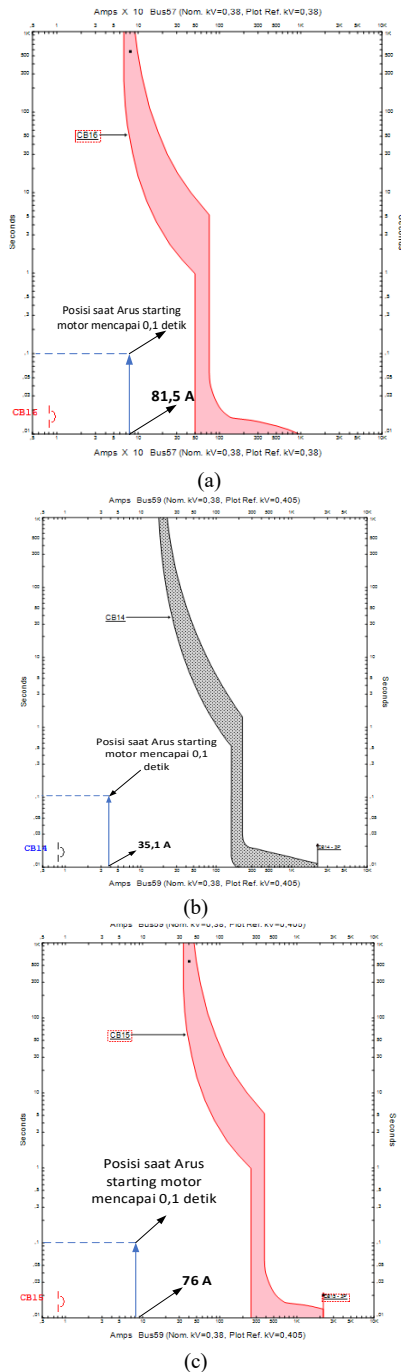
Berdasarkan Tabel IV. penggantian Circuit Breaker ini merupakan bentuk penyesuaian proteksi sistem kelistrikan terhadap beban dan karakter kurva *trip* pemutusan. Dengan menaikkan kapasitas CB dari 63 A ke 125 A, sistem ini mampu menangani arus lebih besar tanpa memicu pemutusan proteksi prematur. Hal ini penting untuk menjaga kontinuitas suplai listrik serta menghindari kerusakan pada peralatan akibat ketidaksesuaian kapasitas CB terhadap beban operasional.

Gambar 9. (a) Pemutusan Hubung Singkat Redesain (b) *Star-View* redesain

Pada Gambar 9. (a) kondisi *Star View trip* CB yang sudah dalam kondisi urut, dibuktikan pada Gambar9. (b), dimulai dari CB 15 waktu pemutusan 0,0131 A, CB pembagi II durasi pemutusan 0,0215s dan CB Utama 0,0224s. Data tersebut menunjukkan waktu pemutusan di setiap gawai proteksi sudah sesuai, sehingga apabila terjadi gangguan 3 phase, sistem akan memutus arus dengan mentripkan CB terdekat agar tidak mengganggu kinerja motor induksi diluar CB tersebut. Untuk kondisi *starting* pada kurva *trip* CB Gambar 4.5 eksisting dan 4.6 redesain terlihat tidak memutus kurva CB, bahkan CB 15 dan CB Pembagi II tidak merasakan saat arus start berlangsung pada waktu 0,1 detik. Sehingga telah sesuai dengan standar.

F. Kondisi Gawai Proteksi saat Motor Start

Percobaan ini dilakukan untuk melihat posisi nilai arus pada kurva pemutusan saat kondisi *starting* sehingga tidak menimbulkan *trip* pada arus maksimum di 0,1 detik. Untuk penyajian kurva *trip* dilakukan dengan menganalisa CB terdekat sebagai pengaman motor induksi mengingat konfigurasi sistem menggunakan model *starting* (DOL).



Gambar 10. 3 (tiga) Variasi Pemutusan Gangguan pada ETAP (a) Kurva Trip Gawai Proteksi 62 A (b) Kurva Trip Gawai Proteksi 32 A (c) Kurva Trip Gawai Proteksi 16 A

Pada Gambar 10. merupakan kurva *trip* *Circuit Breaker* yang digunakan pada motor induksi pabrik pengolahan garam, saat *starting* motor kondisi pada gambar (a) CB16 hanya merasakan adanya arus lebih yang terjadi (panah biru) di 81,5 A, tetapi tidak sampai memutus *thermal magnetic* yang ada pada gawai proteksi sampai dengan melewati waktu 0,1 detik (garis putus-putus), sedangkan untuk gambar (b) dan (c) arus *starting* tidak menyentuh kurva *trip* CB, hanya tercatat 35,1 dan 76 A sehingga kedua gawai proteksi tidak merasakan adanya arus lebih yang mengalir sampai dengan 0,1 detik. Fenomena ini membuktikan bahwa penggunaan MCB tersebut telah sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan sistem. Pemilihan dan pengaturan karakteristik CB ini mengacu pada standar IEC 60898 dan IEC 60947-2, yang menetapkan kriteria waktu-trip, arus nominal, serta ketahanan terhadap arus lebih dan arus hubung singkat untuk perangkat proteksi instalasi tegangan rendah.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, ditemukan adanya perbedaan nilai tegangan antara perhitungan menggunakan rumus dan simulasi yang dilakukan dengan ETAP, baik dalam kondisi *steady state* maupun saat *starting* di 0,1 detik sebelum dan sesudah sistem terpengaruh oleh PV. Perbedaan ini yang berada dalam kisaran 13,87 Volt hingga 78,17 Volt kondisi Waktu Beban Puncak (WBP), disebabkan oleh perbedaan pendekatan antara metode perhitungan manual dan simulasi. Selain itu, evaluasi terhadap perangkat proteksi menunjukkan bahwa konfigurasi eksisting belum memberikan koordinasi yang optimal, sehingga dibutuhkan penggantian CB utama dari kapasitas 63A menjadi 125A agar sistem proteksi dapat bekerja secara berurutan. Namun demikian, saat terjadi *starting* motor secara serentak dengan waktu 0,1 detik, sistem tetap berfungsi normal karena lonjakan arus tidak melewati kurva *trip* CB, yang menandakan bahwa sistem masih mampu menahan kondisi transien tanpa menyebabkan gangguan. Penelitian ini memberikan kontribusi di bidang sistem tenaga listrik melalui validasi perbedaan hasil antara perhitungan manual dan simulasi ETAP, yang menunjukkan pentingnya pendekatan berbasis simulasi untuk hasil yang lebih akurat. Selain itu, penelitian ini mendorong peningkatan akurasi desain sistem melalui pertimbangan kondisi dinamis dan transien, serta memberikan masukan praktis dalam optimasi koordinasi proteksi, seperti rekomendasi penggantian CB utama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BP, "Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets. and authoritative publications in the field of energy," 2021.
- [2] M. F. Ali, M. A. Halim, M. M. Julhash, and M. Ashikuzzaman, "Economic and Environmental Benefits of Grid-Connected PV-Biomass Systems in a Bangladeshi University: A HOMER Pro Approach," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2025, no. 1, 2025, doi: 10.1155/etep/5053853.

- [3] T. Kobashi, Y. Choi, Y. Hirano, Y. Yamagata, and K. Say, "Deeply decarbonizing residential and urban central districts through photovoltaics plus electric vehicle applications," 2021.
- [4] L. R. Visser, E. M. B. Schuurmans, T. A. AlSkaif, H. A. Fidler, A. M. van Voorden, and W. G. J. H. M. van Sark, "Regulation strategies for mitigating voltage fluctuations induced by photovoltaic solar systems in an urban low voltage grid," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 137, no. November 2021, p. 107695, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107695.
- [5] M. Emarati, M. Barani, H. Farahmand, J. Aghaei, and P. C. del Granado, "A two-level over-voltage control strategy in distribution networks with high PV penetration," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 130, no. October 2020, p. 106763, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106763.
- [6] F. Peprah, S. Gyamfi, M. Amo-Boateng, and E. Effah-Donyina, "Impact assessment of grid tied rooftop PV systems on LV distribution network," *Sci. African*, vol. 16, p. e01172, 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01172.
- [7] V. Sharma, S. M. Aziz, M. H. Haque, and T. Kauschke, "Effects of high solar photovoltaic penetration on distribution feeders and the economic impact," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 131, no. December 2019, p. 110021, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110021.
- [8] J. D. Pradhan, S. S. Hadpe, and R. G. Shrivastava, "Analysis and design of overcurrent protection for grid-connected microgrid with PV generation," *Glob. Transitions Proc.*, vol. 3, no. 1, pp. 349–358, 2022, doi: 10.1016/j.gltp.2022.03.023.
- [9] A. Reda, A. F. Abdelgawad, M. I. Elsayed, and F. B. Al-Dousar, "Multi-characteristic overcurrent relay of feeder protection for minimum tripping times and self-protection," *Electr. Eng.*, vol. 105, no. 2, pp. 605–617, 2023, doi: 10.1007/s00202-022-01683-5.
- [10] K. M. Banjar-Nahor, M. Ikhsan, and N. Hariyanto, "Desain Koordinasi Sistem Proteksi Untuk Microgrid Berbasis Inverter," *J. EECCIS (Electrics, Electron. Commun. Control. Informatics, Syst.)*, vol. 16, no. 3, pp. 79–84, 2022, doi: 10.21776/jeccis.v16i3.1615.
- [11] M. Al Talaq and C. A. Belhaj, "Optimal PV penetration for power losses subject to transient stability and harmonics," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 175, pp. 508–516, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.07.072.
- [12] J. L. M. Pereira, A. F. R. Leal, G. O. de Almeida, and M. E. de L. Tostes, "Harmonic effects due to the high penetration of photovoltaic generation into a distribution system," *Energies*, vol. 14, no. 13, 2021, doi: 10.3390/en14134021.
- [13] P. V. V. Mehtre and I. Katakwar, "Load Flow Analysis of Power System in ETAP," vol. 12, no. 4, pp. 64–69, 2024, doi: 10.17148/IJIREICE.2024.12409.
- [14] E. Ubom, I. Akpaden, M. Enin, and U. Ukommi, "Design And Construction Of Direct On Line Starter (DOL) For 3-Phase Electric Motor," no. January, 2024.
- [15] J. G. Lasso, D. Castelo Branco, A. Magrini, and D. Matos, "Environmental life cycle-based analysis of fixed and single-axis tracking systems for photovoltaic power plants: A case study in Brazil," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 11, no. November, 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100586.
- [16] R. Adolph, "User Manual HYD 5-20KTL-3PH," pp. 1–23, 2016.
- [17] N. C. Yang and C. H. Tseng, "Adaptive convergence enhancement strategies for Newton-Raphson power flow solutions in distribution networks," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 18, no. 13, pp. 2339–2352, 2024, doi: 10.1049/gtd2.13197.
- [18] K. G. R. F. Comester *et al.*, "Voltage Impact of Roof-Top Solar Photovoltaic Systems on Low Voltage Network and Measures of Mitigation," *Ceylon Electr. Board, R D J.*, no. May, pp. 9–17, 2024, [Online]. Available: https://ceb.lk/front_img/img_reports/1596152714CEB_RD_Journal_June_2020.pdf
- [19] *IEEE Recommended Practice for Conducting Motor-Starting Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE Std 3002.7, 2019. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8700700.
- [20] and A. I. A. G. A. Ibrahimusa, T. Joko, T. Wrahatnolo, "Analisis Koordinasi Setting Relay Proteksi Pada Jaringan Distribusi 20KV Penyulang Brenggolo Di PT.PLN UP3 Kediri Gardu Induk Pare," *Tek. Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 28–36, 2022.
- [21] K. A. Lee, Y. M. Cho, and H. J. Lee, "Circuit model and analysis of molded case circuit breaker interruption phenomenon," *Electron.*, vol. 9, no. 12, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/electronics9122047.