Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan (JTMIT) Vol. 5, No. 3, September 2026 pp. 1948 - 1958
P-ISSN: 2829-0232 E-ISSN: 2829-0038

Optimasi Pelepasan Beban Menggunakan Skema Pertahanan Adaptif Saat Terjadi Kondisi Gangguan Beban Lebih Pada Subsistem Mandirancan

Khrisna Ismayadi S.K[1*], Dhami Johar Damiri[2], Hakimul Batih[3]
[1,2,3] Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, DKI Jakarta
Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta, 11750
Email: khrisna2310052@itpln.ac.id, dhami@itpln.ac.id, hakimul.batih@itpln.ac.id

ABSTRAK

Meningkatnya pertumbuhan beban pada Subsistem Mandirancan berpotensi meningkatkan kerawanan sistem tenaga listrik di wilayah tersebut. Hal tersebut dapat terjadi apabila terjadi kontingensi yang menyebabkan pembebanan lebih *(overload).* Sistem skema pertahanan (*Defense Scheme)* yang terimplementasi pada sistem kelistrikan Subsistem Mandirancan membutuhkan sebuah pengembangan disain sebagai langkah mitigasi dalam menghadapi kondisi gangguan sistem tenaga listrik beban lebih. Penelitian ini mengusulkan desain skema pertahanan adaptif yang mengintegrasikan peralatan SCADA, telekomunikasi, dan sistem proteksi dengan memanfaatkan infrastruktur Gardu Induk yang ada dan disain logika pelepasan beban yang adaptif berdasarkan kondisi real-time. Metode pengujian dilakukan menggunakan perangkat server *controller, gateway, data concentrator unit, master trip defense scheme* dan *simulator remote station* yang diintegrasikan menjadi suatu sistem skema pertahanan adaptif. Pada studi kasus kontingensi N-1 IBT 1&2 500/150kV Mandirancan dengan set point sebesar 400MW, memberikan hasil akurasi pelepasan beban tanpa deviasi dan efektivitas pelepasan target 18 Trafo 100% dengan durasi waktu aksi selama 24 ms, akurasi pelepasan beban sangat penting untuk mengurangi kelebihan jumlah pemadaman tanpa mengesampingkan kestabilan sistem tenaga listrik.

Kata Kunci: Skema Pertahanan Adaptif, *Overload, SCADA, Remote Station*

ABSTRACT

The increasing load growth in the Mandirancan Subsystem potentially heightens the power system's vulnerability in the region, particularly during contingency events that lead to overloading conditions. The defense scheme system currently implemented in the Mandirancan power system requires enhanced design as a mitigation strategy against overload disturbance conditions. This study proposes an adaptive defense scheme design that integrates SCADA, telecommunications, and protection systems by utilizing existing substation infrastructure and real-time adaptive load-shedding logic. The testing methodology employs a server controller, gateway, data concentrator unit, master trip defense scheme, and remote station simulator integrated into an adaptive defense scheme system. In the N-1 contingency case study of Interbus Transformers (IBT) 1 & 2 500/150 kV Mandirancan with a 400 MW setpoint, the proposed scheme achieved zero-deviation load-shedding accuracy and 100% shedding effectiveness across 18 target transformers with an action response time of 24 ms. Accurate load shedding is crucial to prevent unnecessary power outages while maintaining power system stability.

Keywords: *Adaptive Defense Scheme, Overload, SCADA, Remote Station*

Pendahuluan

Stabilitas sistem tenaga listrik, merupakan persyaratan pokok yang harus dipertahankan agar pengusahaan operasi sistem dapat melayani konsumen secara kontinyu, andal, berkualitas, dan ekonomis. Salah satu tantangan dalam menjaga kestabilan sistem adalah gangguan yang terjadi di pembangkit listrik, yang berpotensi menyebabkan ketidakseimbangan beban hingga terjadi pemadaman listrik baik skala kecil maupun luas [1][2]. Salah satu contoh pada gangguan di PLTU Cirebon Electric Power (CEP) yang terjadi pada 1 Mei 2025 pukul 20:18 WIB, yang menyebabkan trip pada PMT 150 kV 5A2 dan 5AB2 arah Unit-1 PLTU CEP di GI PLTU CEP yang menyebabkan pembebanan IBT-1 dan 2 GITET Mandirancan meningkat sehingga menyentuh setting Overload Shedding (OLS) dan berdampak pada berkerjanya skema pertahanan OLS di Inter Bus Transformer (IBT) Mandirancan dengan melakukan pelepasan beban target. Dampak gangguan adalah 3 GI hilang tegangan yaitu GI 70 kV Kuningan, GI 150 kV Brebes dan 150 kV GI Tarub dan 3 GI Busbar hilang

tegangan pada GI 70 kV Sunyaragi, GI 150 kV Kebasen dan 150 kV Pemalang. Jumlah beban padam wilayah UP2B Jabar sebesar 91,75 MW dan UP2B Jateng sebesar 230 MW dengan Energy Not Served (ENS) sebesar 44,52MWh [3].

Disisi teknis skema pertahanan eksisting terdapat kegagalan pada skema Tahap-1 dimana TRAFO#2 GI Babakan tidak trip. Gagal trip ini pada kondisi gangguan menyebabkan pemadaman beban tidak semakin banyak (beban TRAFO#2 20 MW) [4]. Disisi lain, apabila terjadi kegagalan pada skema pertahanan dapat menyebabkan bekerjanya Tahap berikutnya yang dapat mengakibatkan semakin banyaknya beban padam. Hal yang lebih ekstrim apabila terjadi kegagalan dalam skema pertahanan adalah tidak berfungsi nya skema pertahanan yang sudah dirancang sehingga menyebabkan pemadaman meluas karena IBT 500/150kV 1,2 Mandirancan Trip dikarenakan overload dengan estimasi beban padam sebesar 945,7 MW. Besarnya jumlah beban yang padam menunjukan perlunya evaluasi mendalam terhadap efektivitas skema pertahanan seperti OLS yang saat ini diterapkan, serta kebutuhan peningkatan keandalan operasi sistem tenaga listrik melalui penerapan teknologi terkini yang mampu merespon gangguan secara cepat, akurat dan efektif [5].

Perkembangan teknologi yang semakin canggih memberikan peluang untuk mengembangkan skema pertahanan yang lebih selektif, andal, dan responsif. Salah satu teknologi terkini adalah penggunaan Intelligent Electronic Device (IED) pada Gardu Induk Digital atau Digital Substation atau Substation Automation System (SAS) yang memiliki fitur protokol IEC 61850 (Generic Object Oriented Substation Event - GOOSE). Penggunaan protokol komunikasi IEC 61850 GOOSE terbukti memberikan latensi rendah, andal, dan interoperabilitas yang baik [6][7]. Selain itu, penggunaan jaringan telekomunikasi berbasis Fiber Optic (FO) yang terintegrasi melalui switch berkemampuan High Availability Seamless Redundancy (HSR) juga mendukung keandalan komunikasi data secara real-time di dalam sistem tenaga listrik. Pada Subsistem Mandirancan, Gardu Induk yang sudah menerapkan Substation Automation System (SAS) / Gardu Induk Otomasi berjumlah 11 GI dan 9 GI menggunakan RTU. Beberapa penelitian mengenai skema pertahanan adaptif telah dilakukan sebelumnya seperti dengan mengintegrasikan peralatan SCADA (IED, RTU), PMU dan DFR [8][9].

Dalam upaya meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik, teknologi Adaptive Defense Scheme (ADS) /skema pertahanan adaptif sedang dikembangkan di PT PLN (Persero) UP2B Jawa Barat. Skema adaptif secara signifikan lebih efektif dibanding skema konvensional karena mampu mengakomodasi perubahan kondisi jaringan listrik secara real-time [10][11]. Skema pertahanan adaptif adalah sistem otomatis yang dirancang untuk mendeteksi secara cepat dan merespons gangguan dalam jaringan sistem tenaga listrik, meminimalkan dampaknya, dan memulihkan layanan sesegera mungkin. Teknologi ini menggabungkan sistem Teknologi Informasi, Sistem Proteksi dan SCADA [12][13]. Keunggulan utama dari skema pelepasan beban adaptif dibandingkan dengan skema konvensional adalah kecepatan respons dan akurasi dalam menentukan jumlah dan lokasi pelepasan beban. Hal ini membuat pelepasan beban yang dilakukan menjadi lebih selektif, efisien, serta meminimalisir dampak pemadaman berlebih (over-shedding), sehingga pemulihan kondisi paska gangguan pun dapat menjadi lebih cepat.

Metode Penelitian

Penelitian dan pengumpulan data dilaksanakan pada 1 Juni 2025 sampai 25 Juli 2026 di PT PLN UP2B Jawa Barat. Penelitian ini akan menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimental untuk mendisain rancangan skema pertahanan adaptif, menguji logic skema adaptif dan mengkaji serta menganalisis potensi optimalisasi skema pertahanan adaptif. Disain rancangan sistem skema pertahanan adaptif menggunakan data peralatan yang terpasang di Gardu Induk pada Subsistem Mandirancan dan studi literatur. Untuk pengujian logic pertahanan adaptif menggunakan peralatan sebagai berikut:

Tabel 1. Daftar Peralatan Pengujian

NO	PERALATAN	FUNGSI	SOFTWARE
1	Schneider Perfectron SCH RA9	Server HMI	iFLS
2	Advantech ACP4320	Server Controller	EcoSUI & iVIEW
3	Advantech ECU 579	Gateway Controller	EPAS Gateway
4	Schneider C264	MTDS	SCE epas
5	Schneider Sitel DP	DCU	Easergy Builder

Hasil simulasi akan digunakan untuk menganalisa tingkat akurasi pelepasan beban skema pertahanan adaptif terhadap kontingensi gangguan yang direncanakan.

Data peralatan SCADA di Gardu Induk Subsistem Mandirancan dipergunakan untuk merancang disain skema pertahanan adaptif dengan memanfaatkan peralatan yang terpasang pada Gardu Induk eksisting, hal ini bertujuan untuk efektivitas dan efisiensi biaya investasi pada penerapannya. Sinyal yang diperlukan dari

peralatan SCADA berupa Telesignalling (TS) / sinyal status peralatan Circuit Breaker (CB) dan Disconnecting Switch (DS) Busbar. Status peralatan ini bertujuan untuk memantau kondisi Bay yang di targetkan sebagai pelepasan beban. Telemetering (TM) / pengukuran Watt (W) atau Daya Aktif. [14] Pengukuran Bay digunakan sebagai arming atau jumlah kuotan beban yang digunakan sebagai kalkulasi pelepasan beban.

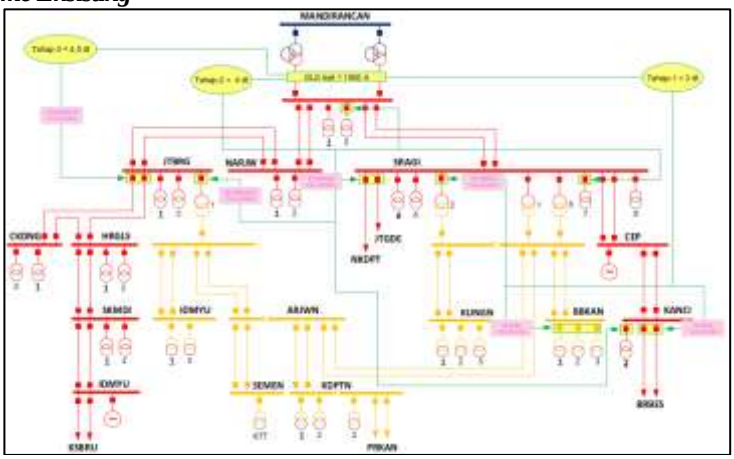
Berdasarkan data yang telah dikumpulkan, dapat dibuat 2 kelompok sistem SCADA, yaitu sistem SCADA yang mengadopsi teknologi Substation Automation System (SAS) dan Gardu Induk konvensional yang menggunakan Remote Terminal Unit (RTU). Pada Gardu Induk berteknologi SAS, akuisisi data status peralatan dan pengukuran berasal dari BCU menggunakan protokol IEC 61850. Sedangkan Gardu Induk RTU, akuisisi data status peralatan melalui modul Digital Input dan Digital Output, serta Digital Power Meter untuk pengukuran, dikrim ke Control Center menggunakan protokol IEC 60870-5-104 [15][16].

Pada penelitian yang dilakukan, studi kasus dilakukan pada skenario waktu beban puncak malam. Skenario beban yang dikaji tersebut merupakan prediksi beban di Subsistem Mandirancan pada Bulan Desember 2025 yang menunjukkan terkait distribusi pembebanan trafo di setiap Gardu Induk. Adapun data skenario beban dilihat pada Tabel berikut:

Metode analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi akurasi dan efektivitas skema pertahanan adaptif (Adaptive Defense Scheme / ADS) pada Subsistem Mandirancan. Proses analisis dibagi menjadi 2 tahapan utama yaitu formulasi optimasi matematis pelepasan beban dan pengujian performa logic algoritma pada perangkat keras ADS. Analisis validasi logic algoritma ADS pada perangkat keras dengan menganalisis data empiris hasil pengujian pada laboratorium menggunakan perangkat keras ADS. Hasil yang dianalisis meliputi akurasi pelepasan beban dengan menghitung nilai deviasi atau selisih antara sisa beban akhir trafo pasca eksekusi pelepasan beban ADS terhadap set point operasi yang telah ditentukan. Nilai deviasi ini dianalisis untuk membuktikan kemampuan sistem ADS dalam mencegah pemadaman berlebihan (over-shedding). Analisis kecepatan respon logic algoritma ADS dengan menganalisis total waktu pengiriman sinyal proteksi oleh Server Controller untuk merespon skenerio kontingensi gangguan yang telah ditentukan.

Hasil Dan Pembahasan

Kondisi *Defense Scheme Eksisting*



Gambar 1. Skema OLS IBT Mandirancan

Skema OLS ini dibutuhkan ketika PLTU CEP Outage dan kontingensi N-1 pada IBT di GITET Mandirancan. Ketika salah satu dari IBT Mandirancan mengalami gangguan, maka beban pada IBT tersebut akan pindah ke IBT lainnya sehingga dapat menyebabkan overload IBT yang membuat trip. Pada kondisi ini dibutuhkan pelepasan beban untuk menjaga kondisi IBT agar tidak overload dan mengalami trip dengan cara pemasangan relay Overload Shedding (OLS) [17][18]. Relay OLS disetting berdasarkan kemampuan peralatan paling kecil pada bay IBT tersebut (Inom IBT). Relay OLS memiliki setting (Isett) yaitu 1,1 x Inom IBT. Pada skema ini, kemampuan terendah peralatan sebesar 1718 A, sehingga OLS disetting sebesar 1900 A. Pada skema OLS IBT 500/150kV 1&2 Mandirancan, skenario dari kondisi ini adalah saat PLTU CEP Outage dan salah satu IBT mengalami gangguan (trip) maka akan berdampak pada overload pada IBT lainnya, sehingga diperlukan aksi dengan cara mengurangi beban yang terhubung pada konfigurasi jaringan [19][20].

Sistem pertahanan OLS IBT 1&2 500/150kV Mandirancan menggunakan rele OCR sebagai sensor Arus yang terpasang di IBT 500/150kV sisi LV (150kV), dan mekanisme intertripping pelepasan beban menggunakan Teleproteksi (TP) melalui media komunikasi Multiplexer. Setting Overload Sheeding (OLS)

sebagai berikut: Setting OCR: I = 2125 A; Setting OLS: Tahap-1 I = 1900 A t = 3 detik, Tahap-2 I = 1900 A t = 4 detik dan Tahap-3 I = 1900 A t = 4,5 detik dengan target pelepasan beban, yaitu: Tahap-1 GI Sunyaragi IBT#2 (intertripping), GI Babakan Trafo#1, Trafo#2 dan Trafo#3 (intertripping), SUTT Kanci-Brebes#1 dan SUTT Kanci-Brebes#2 (intertripping); Tahap-2 GI Mandirancan Trafo#2 (lokal), GI Sunyaragi Trafo#7 (intertripping), GI Kanci Trafo#2 (intertripping), GI Jatibarang IBT#1 (intertripping) dan SUTT Sunyaragi-Jatibarang dan SUTT Sunyaragi-New Kadipaten (intertripping). Dan Tahap-3 SUTT Jatibarang-Cikedung dan SUTT Jatibarang-Haurgeulis (intertripping).

Dikarenakan target pelepasan beban nya statis, maka apabila terjadi perubahan kondisi sistem kelistrikan semisal pertumbuhan beban ataupun perubahan konfigurasi sistem, maka ada potensi bahwa skema OLS yang di implementasikan tidak sesuai yang direncanakan baik itu kekurangan pelepasan beban maupun kelebihan pelepasan beban. Selain itu apabila terjadi kegagalan pada target pelepasan beban, maka akan berpotensi menyebabkan kegagalan sistem skema pertahanan dikarenakan target tidak dapat digantikan dengan target lain secara otomatis. Saat terjadi Gangguan PLTU CEP gangguan yang menyebabkan IBT 1&2 500/150kV Mandirancan Overload, terdapat target pelepasan beban yang gagal yaitu Trafo-2 150/70kV GI Babakan.

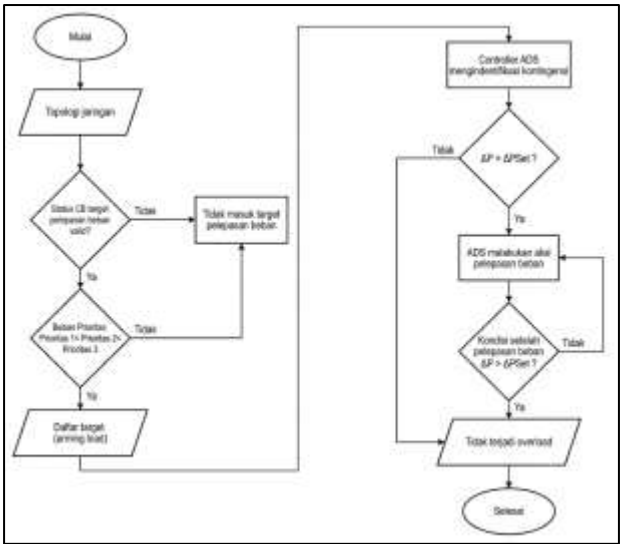
Berdasarkan pemaparan yang telah disampaikan terkait disain skema pertahanan eksisting tersebut dapat disimpulkan bahwa terdapat 2 poin kekurangan, pertama disain skema pertahanan eksiting dibangun berdasarkan data histori pembebanan untuk menentukan kuota target pelepasan beban, sehingga diperlukan evaluasi rutin agar skema tersebut dapat tetap berfungsi dengan baik dan optimal. Kedua, target pelepasan beban yang statis ditentukan di awal perencanaan memiliki kelemahan apabila terjadi kegagalan maka akan berdampak pada kurangnya kuota pelepasan beban target yang dapat menyebabkan kegagalan sistem skema pertahanan secara keseluruhan.

Optimasi Skema Pertahanan Adaptif

Prinsip kerja skema pertahanan adaptif secara umum dibagi menjadi dua fase utama. Pembagian fase ini bertujuan untuk memisahkan proses komputasi analitis yang membutuhkan waktu pemrosesan (computation time) dengan proses eksekusi aktual yang menuntut kecepatan respon tinggi dalam skala milidetik.

Fase pertama atau fase antisipasi merupakan tahapan antisipasi yang berjalan secara terus-menerus untuk mempersiapkan skenario mitigasi sebelum gangguan benar-benar terjadi. Filosofi dasar dari fase ini adalah memprediksi dampak kontingensi dengan menjawab parameter (apa yang harus dilepas jika gangguan X terjadi). Pada tahapan ini, server controller melakukan komputasi awal (pre-computing) terhadap seluruh beban dari kemungkinan kontingensi yang mungkin akan terjadi pada sistem jaringan. Proses ini didukung oleh pemantauan model topologi jaringan secara real-time (topological model) dan konfigurasi prioritas beban. Hasil dari kalkulasi analitis pada fase antisipasi ini adalah sebuah matriks pelepasan beban yang dinamis dan real time yang siap digunakan kapan saja sebagai target pelepasan beban.

Fase kedua atau fase aksi merupakan tahapan eksekusi yang dipicu ketika suatu kontingensi atau gangguan beban lebih terdeteksi pada sistem kelistrikan. Karakteristik utama dari fase aksi ini adalah kecepatan respon yang sangat masif dan cepat guna mengamankan stabilitas transien jaringan. Mekanisme pada fase ini dibagi lagi menjadi tiga tahapan sekuensial yang bekerja secara simultan. Tahap Deteksi Kontingensi (Contingency Detection Phase). Sistem menerima sinyal gangguan secara instan memanfaatkan protokol komunikasi berkecepatan tinggi melalui mekanisme GOOSE trigger. Tahap Reaksi (Reaction Phase). Server Controller langsung melakukan keputusan pelepasan beban berdasarkan matriks yang telah dikalkulasi sebelumnya (pre-computed matrix) pada fase antisipasi sehingga mengefesiensikan waktu kalkulasi algoritma saat kontingensi terjadi. Tahap Pelepasan Beban (Shed/Trip Phase). Perintah trip dikirimkan melalui sinyal perintah kontrol melalui protokol IEC61850 GOOSE ke CB Trafo yang telah ditentukan melalui perangkat MTDS [21][22].



Gambar 2. Diagram Alir Algoritma ADS

Logika algoritma Adaptive Defense Scheme (ADS) dalam mengondisikan parameter sistem tenaga listrik pasca-kontingensi beban lebih (overload) dengan melakukan kalkulasi dan eksekusi pengurangan beban agar pembebanan akhir dapat dipertahankan sedekat mungkin dengan batas set point operasi aman yang telah ditentukan. Target pembebanan ini merupakan batas kritis operasional untuk mencegah kerusakan termal pada Material Transmisi Utama (MTU) sekaligus menjaga kontinuitas penyaluran daya pada Subsistem Mandirancan. Tingginya akurasi pelepasan beban agar mendekati nilai set point berasal dari efektivitas fungsi penentuan kuota arming yang dinamis menggunakan data real time pembebanan. Dalam mengantisipasi kontingensi beban lebih (overload), algoritma tidak melakukan pelepasan beban secara acak maupun statis, melainkan melalui tahapan kalkulasi real-time terhadap selisih daya antara kondisi aktual gangguan dengan target set point. Sistem ADS secara otomatis menyusun kombinasi matriks Trafo (preselected load) yang total dayanya paling sesuai untuk menutupi defisit tersebut.

Melalui optimalisasi pelepasan beban ini, keputusan pelepasan beban yang dilakukan oleh sistem ADS menjadi sangat selektif. Logika ADS berhasil mengidentifikasi dan melepas beban dalam jumlah yang paling optimal, sehingga parameter operasional IBT dapat segera dikembalikan ke dalam batas aman tanpa mengorbankan keandalan pasokan daya pada wilayah yang tidak terdampak gangguan Dilakukan juga kondisi target pelepasan beban dengan membuat prioritas dengan mempertimbangkan status target, prioritasisasi ini bertujuan untuk meminimalkan dampak sosial-ekonomi akibat pemadaman listrik, menjaga kontinuitas pasokan pada objek vital nasional, serta memastikan kuota beban yang dilepas optimal dan presisi sesuai dengan defisit daya yang terjadi tanpa menyebabkan pelepasan beban berlebihan (over-shedding) [23][24].

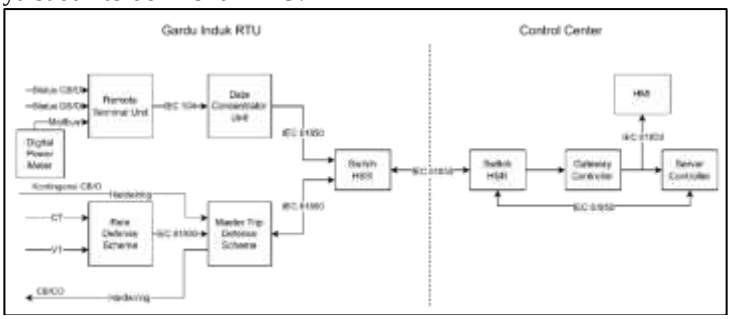
Rancangan Disain Skema Pertahanan Adaptif

Proses akuisisi data sistem pertahanan adaptif dibagi menjadi beberapa bagian pertama akuisis data untuk Topologi jaringan. Sinyal yang diperlukan berupa status CB dan DS Bus serta Pengukuran (metering) sumber dan beban yang berasal dari data SCADA GI. Kedua akuisisi data untuk aksi skema pertahanan: sinyal trigger dari rele OLS yang berasal dari hardwiring CT dan VT. Status CB dan DS Bus yang berasal dari hardwiring status CB Open pada Panel Kontrol. Ketiga akuisisi data untuk komputasi algoritma ADS: sinyal trigger dari rele OLS untuk kontingensi parameter base. Status CB untuk kontingensi event base. Status DS Bus untuk proteksi logic trigger ADS

Dalam skenario akuisisi data Telesinyal (TS) dan Telemeter (TM) dari Gardu Induk eksisting, pemilihan antara IEC 60870-5-104 (IEC 104) atau IEC 61850 akan sangat bergantung pada arsitektur bawaan di masing-masing Gardu Induk tersebut. Secara umum, pendekatan terbaik adalah menggunakan protokol yang paling umum dengan arsitektur eksisting untuk menghindari kompleksitas konversi data yang tidak perlu. Berikut adalah analisis mengenai opsi terbaik untuk masing-masing jenis Gardu Induk beserta keunggulan dan kelemahannya.

Pada Gardu Induk konvensional dengan RTU, data TS dan TM dikumpulkan dari lapangan/switchyard menggunakan pengkabelan tembaga hardwire ke modul Digital Input (DI) dan Analog Input (AI) pada RTU, atau RTU bertindak sebagai data konsentrator dari IED atau Digital Power Meter melalui protokol Modbus TCP IP. Keunggulan menggunakan protokol IEC104 untuk akuisisi data pada Gardu Induk RTU adalah hampir semua RTU sudah mendukung port Ethernet dengan protokol komunikasi upstream ke Master Station/Control Center berbasis IEC 104. Dan untuk jenis Smart RTU sudah mendukung teknologi komunikasi multimaster, yaitu RTU dapat berkomunikasi secara simultan ke dua alau lebih Master Station/Control Center. Selain itu

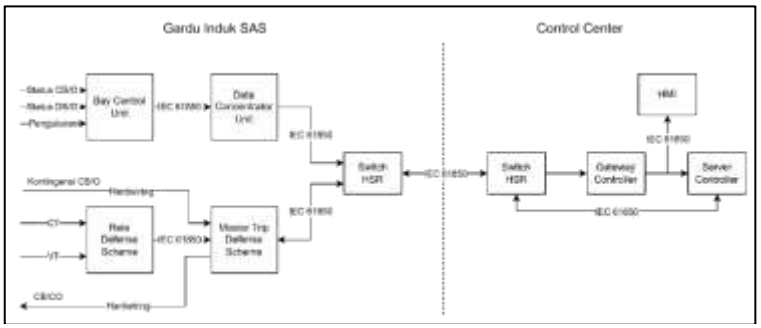
karena arsitektur yang sederhana, hanya diperlukan menarik satu koneksi jaringan IP dari RTU ke sistem akuisisi data (Data Concentrator Unit). Pemetaan data langsung merujuk pada IOA (Information Object Address) yang biasanya sudah terdefinisi di RTU.



Gambar 3. Desain ADS-GI RTU

Pada Gardu Induk berteknologi SAS, data dari peralatan CB (pemutus), DS (pemisah) dan pengukuran sudah berupa data digital. IED BCU di level bay terhubung ke jaringan lokal (Substation Bus) menggunakan switch Ethernet. Di atasnya pada level station, terdapat server Local HMI / Gateway yang mengonsolidasikan data. Opsi terbaik akuisisi data menggunakan Protokol IEC 61850.

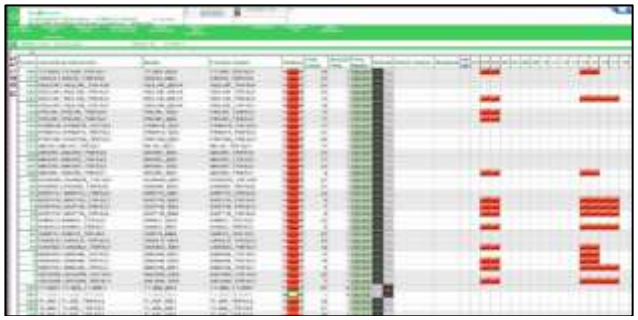
Pemilihan menggunakan opsi ini adalah mendapatkan data yang sangat detail, tidak hanya status CB dan DS open/close (TS) juga nilai pengukuran arus, tegangan, daya aktif (TM), serta data diagnostik IED hingga health status. Selain itu kemudahan pemetaan data cukup mempunyai file konfigurasi .SCD (Substation Configuration Description) dari SAS eksisting, proses import data ke Data Consentrator berbasis XML ini berjalan sangat cepat tanpa perlu memetakan alamat satu per satu.



Gambar 4. Desain ADS-GI SAS

Sinyal sensing dari Rele OLS dikirim ke Master Trip Defense Scheme (MTDS) menggunakan protokol IEC 61850, sinyal yang diambil adalah sinyal trigger saat Rele OLS mencapai nilai overload. Sinyal pengukuran (metering) dan status CB dan DS Bus yang digunakan untuk topologi berasal dari SCADA SAS (BCU) menggunakan protokol IEC 61850. Sinyal status CB yang digunakan untuk kontingensi berasal harwiring ke MTDS di GI. Sama halnya dengan status DS Bus untuk Logic trigger. Sinyal tripping untuk melepas beban dari Server Controller dikirim ke MTDS yang ada di GI tersebar secara langsung tanpa melalui Gateway menggunakan protokol IEC 61850 untuk memilimalisir waktu transmit sinyal. Untuk jaringan komunikasi menggunakan perangkat switch HSR.

Pengujian Skema Pertahanan Adaptif



Gambar 5. Matriks Kuota Pelepasan Beban

Gambar 5 memberikan informasi terkait pemantauan real-time sistem ADS yang menampilkan matriks target pelepasan beban (load shedding matrix) pada Trafo di Subsistem Mandirancan. Data tersebut merupakan hasil keluaran (output) dari optimasi logika algoritma Adaptive Defense Scheme (ADS) yang telah dirancang. Item yang ditampilkan berupa hierarki kelistrikan (Electrical Hierarchy), identitas node busbar, nama penyulang/bay (feeder name), status CB, beban aktual (Live Load) dalam satuan megawatt (MW), serta skala prioritas target untuk setiap Trafo yang masuk dalam skenario kontingensi beban lebih (overload). Selain itu tertampil status apakah target pelepasan beban kondisi aktif atau non aktif.

Tampilan indikator blok berwarna merah pada kolom 02 hingga 18 merepresentasikan alokasi target pelepasan beban yang direkomendasikan oleh logika algoritma adaptif secara selektif. Berbeda dengan skema pertahanan statis konvensional yang melepas beban secara statis dalam jumlah besaran tertentu, logika algoritma adaptif ini bekerja secara presisi dengan hanya mengeksekusi pelepasan beban dengan beban yang sesuai untuk menutupi defisit daya akibat kontingensi. Pemilihan target pelepasan yang selektif ini secara langsung meminimalkan pemadaman total (over-shedding) tanpa mengesampingkan parameter kestabilan sistem jaringan kelistrikan secara keseluruhan.



Gambar 6. Matriks Arming N-1 IBT 1&2 500/150kV Mandirancan

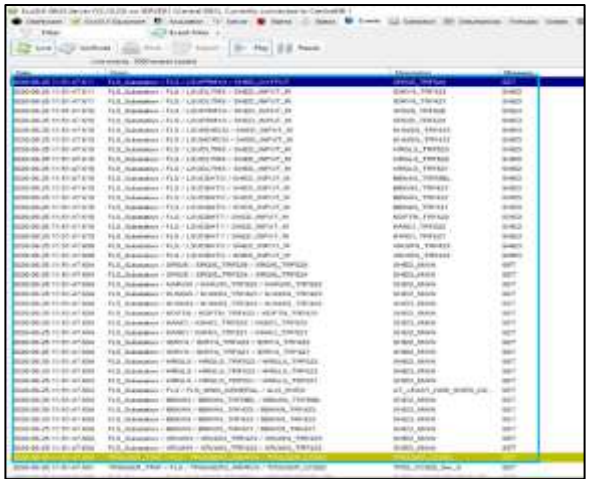
Berdasarkan gambar 6, diperoleh data arming kuota pelepasan beban sebesar 393 MW untuk skenario N-1 IBT 1&2 500/150kV Mandirancan. Data kuota arming tersebut bersifat dinamis berdasarkan kondisi real time, bila ada Trafo yang tidak siap (invalid) maka kuotanya akan digantikan Trafo lainnya.

Pengujian unjuk kerja sistem dilakukan untuk mengevaluasi akurasi dan presisi logika algoritma Adaptive Defense Scheme (ADS) dalam mengondisikan parameter sistem tenaga listrik pasca-kontingensi beban lebih (overload). Fokus utama dari evaluasi ini adalah mengukur kemampuan algoritma dalam melakukan kalkulasi dan eksekusi pengurangan beban agar pembebanan akhir pada Interbus Transformer (IBT) dapat dipertahankan sedekat mungkin dengan batas set point operasi aman yang telah ditentukan, dalam hal ini sebesar 400 MW. Target pembebanan ini merupakan batas kritis operasional untuk mencegah kerusakan termal pada IBT sekaligus menjaga kontinuitas penyaluran daya pada Subsistem Mandirancan.

Tabel 2. Aksi ADS Kontingensi N-1 IBT 1&2 500/150kV Mandirancan

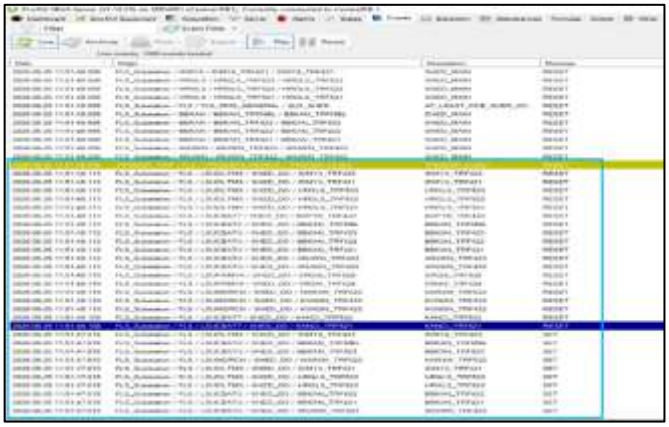
Overload	Setting Setpoint	Setpoint Arming	Actual Arming	Actual Shedding	Deviasi Arming	Akurasi Shedding
793 MW	400 MW	393 MW	393 MW	393 MW	0 MW	100%

Berdasarkan hasil pengujian skenario kontingensi N-1 IBT 1&2 500/150kV Mandirancan, logika algoritma ADS yang terintegrasi pada perangkat kontrol terbukti menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Sebelum terjadi sekenario kontingensi, logika algoritma ADS sudah mengalkulasi beban ril untuk dijadikan kuota pelepasan beban / kuota arming. Setelah skenario gangguan beban lebih dilakukan, sistem ADS secara instan mengeksekusi perintah pelepasan beban. Hasil akhir menunjukkan target pelepasan beban pada IBT-1 berhasil dikondisikan pada angka 393 MW. Realisasi ini tidak memiliki deviasi dengan actual shedding sebesar 393 MW dengan deviasi sebesar 0 MW atau 0%. Margin deviasi yang sangat kecil ini membuktikan bahwa algoritma yang dirancang mampu bekerja secara presisi dalam menghadapi dampak gangguan tanpa menimbulkan pemadaman yang berlebihan di sisi konsumen.



Gambar 7. Event List ADS

Gambar 7 menampilkan event list kronologi urutan kejadian sesuai urutan waktu (sequence of event) dari hasil pengujian skema pertahanan adaptif melalui tampilan EcoSUI SBUS Server. Log data ini menggambarkan respon sistem secara detail, mulai dari inisiasi gangguan kontingensi hingga eksekusi perintah pelepasan beban ke MTDS.



Gambar 8. Event List ADS-2

Berdasarkan data tersebut, urutan kejadian dimulai pada 11:51:47,592 hingga 11:51:47.616, di mana sistem mendeteksi kondisi gangguan beban lebih yang memicu logika algoritma ADS bekerja sampai dengan pelepasan target beban. Fase ini ditunjukkan oleh status Event TRIGGER_TRIP/FLS/TRIGGERS_MDRCN/TRIGGER_CC002 yang bernilai SET dengan keterangan TRIGGER pada 11:51:47,592 yang berarti terdapat sinyal trigger kontingensi parameter base N-1 IBT 1&2 500/150kV Mandirancan, sinyal ini memicu kalkulasi ADS untuk melakukan eksekusi target pelepasan beban yang sebelumnya sudah disiapkan (arming). Aksi pelepasan target beban ditunjukan mulai status Event FLS_Substation/FLS/LSUPRMYA/SHED_DO/SRGI5_TRF528 yang bernilai SET dengan keterangan TRIP pada 11:51:47,612 sampai status Event FLS_Substation/FLS/LSUCBATU/SHED_DO/BBKAN_TRF423 yang bernilai SET dengan keterangan TRIP pada 11:51:47,616. Jumlah target yang dilepas sejumlah 18 Trafo.

Tabel 3. Event Pelepasan Beban N-1 IBT 1&2 500/150kV Mandirancan

Controller Action	**HMI**			
Actual load shed	**Event Name**	**Timetag**	**Value**	**Remark**
	TRIGGER_TRIP/FLS/TRIGGERS_MDRCN/TRIGGER_CC002	11:51:47,592	SET	TRIGGER
SRGI5_TRF528	FLS_Substation/FLS/LSUPRMYA/SHED_DO/SRGI5_TRF528	11:51:47,612	SET	TRIP
SRGI5_TRF524	FLS_Substation/FLS/LSUPRMYA/SHE	11:51:47,612	SET	TRIP

	D_DO/SRGI5_TRF524			
KANCI_TRF522	FLS_Substation/FLS/LSUCBAT7/SHED_DO/KANCI_TRF522	11:51:47,613	SET	TRIP
KANCI_TRF521	FLS_Substation/FLS/LSUCBAT7/SHED_DO/KANCI_TRF521	11:51:47,613	SET	TRIP
KUNGN_TRF423	FLS_Substation/FLS/LSUMDRCN/SHED_DO/KUNGN_TRF423	11:51:47,614	SET	TRIP
KUNGN_TRF422	FLS_Substation/FLS/LSUMDRCN/SHED_DO/KUNGN_TRF422	11:51:47,614	SET	TRIP
HRGLS_TRF521	FLS_Substation/FLS/LSUDLTMS/SHED_DO/HRGLS_TRF521	11:51:47,614	SET	TRIP
ARJWN_TRF422	FLS_Substation/FLS/LSUCBATU/SHED_DO/ARJWN_TRF422	11:51:47,614	SET	TRIP
KDPTN_TRF422	FLS_Substation/FLS/LSUCBAT7/SHED_DO/KDPTN_TRF422	11:51:47,614	SET	TRIP
NARJW_TRF522	FLS_Substation/FLS/LSUMDRCN/SHED_DO/NARJW_TRF522	11:51:47,615	SET	TRIP
IDMY4_TRF421	FLS_Substation/FLS/LSUDLTMS/SHED_DO/IDMY4_TRF421	11:51:47,615	SET	TRIP
HRGLS_TRF523	FLS_Substation/FLS/LSUDLTMS/SHED_DO/HRGLS_TRF523	11:51:47,615	SET	TRIP
HRGLS_TRF522	FLS_Substation/FLS/LSUDLTMS/SHED_DO/HRGLS_TRF522	11:51:47,615	SET	TRIP
BBKAN_TRF422	FLS_Substation/FLS/LSUCBATU/SHED_DO/BBKAN_TRF422	11:51:47,615	SET	TRIP
BBKAN_TRF421	FLS_Substation/FLS/LSUCBATU/SHED_DO/BBKAN_TRF421	11:51:47,615	SET	TRIP
ARJWN_TRF423	FLS_Substation/FLS/LSUCBATU/SHED_DO/ARJWN_TRF423	11:51:47,615	SET	TRIP
IDMY4_TRF423	FLS_Substation/FLS/LSUDLTMS/SHED_DO/IDMY4_TRF423	11:51:47,616	SET	TRIP
BBKAN_TRFMBL	FLS_Substation/FLS/LSUCBATU/SHED_DO/BBKAN_TRFMBL	11:51:47,616	SET	TRIP
BBKAN_TRF423	FLS_Substation/FLS/LSUCBATU/SHED_DO/BBKAN_TRF423	11:51:47,616	SET	TRIP

Proses eksekusi dari mulai adanya trigger kontingensi yang diterima perangkat Server Controller sampai dengan sinyal tripping ke target pelepasan beban pada perangkat MTDS memerlukan waktu 24 ms. Ini membuktikan bahwa algoritma ADS telah berhasil mengeksekusi logika kalkulasi pelepasan secara cepat sesuai yang direncanakan.

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disain skema pertahanan eksisting dapat disimpulkan bahwa terdapat 2 poin kekurangan, pertama disain skema pertahanan eksiting dibangun berdasarkan data histori pembebanan untuk menentukan kuota target pelepasan beban, sehingga diperlukan evaluasi rutin agar skema tersebut dapat tetap berfungsi dengan baik dan optimal. Kedua, target pelepasan beban yang statis ditentukan di awal perencanaan memiliki kelemahan apabila terjadi kegagalan maka akan berdampak pada kurangnya kuota pelepasan beban target yang dapat menyebabkan kegagalan sistem skema pertahanan secara keseluruhan. Simpulan berikutnya, terdapat 2 disain arsitektur sistem pertahanan adaptif berdasarkan peralatan yang terpasang pada Gardu Induk eksisting, desain ini diusulkan mempertimbangkan kemudahan implementasi. Untuk Gardu Induk RTU akuisisi data menggunakan protokol IEC 60870-5-104 karena hampir semua RTU terpasang sudah mendukung port Ethernet dengan protokol komunikasi upstream ke Master Station/Control Center, sedangkan Gardu Induk SAS opsi terbaik akuisisi data menggunakan Protokol IEC 61850 karena akan mendapatkan data yang sangat detail, tidak hanya status CB dan DS open/close (TS) juga nilai pengukuran arus, tegangan, daya aktif (TM), serta data diagnostik IED hingga health status peralatan. Akurasi pelepasan beban menggunakan skema pelepasan beban adaptif berdasarkan hasil penelitian pada kontingensi N-1 IBT 1&2 500/150kV Mandirancan pada kondisi overload IBT-2 sebesar 793 MW, pada sistem ADS ditentukan setpoint 400 MW untuk kondisi masih dalam keadaan aman operasi IBT, Setpoint Arming hasil kalkulasi

algoritma ADS berdasarkan kuota target yang tersedia sebesar 393 MW. Hasil aksi dari sistem ADS untuk kuota target sesuai arming tereksekusi seluruhnya atau tidak memiliki deviasi. Efektivitas pelepasan beban berdasarkan hasil penelitian memiliki akurasi 100%, jumlah target pada kontingensi N-1 IBT 1&2 500/150kV Mandirancan sebanyak 18 Trafo dengan waktu durasi aksi selama 24 ms.

Daftar Pustaka

[1] P. Yu, X. Xiong, X. He, J. Zhu, J. Liang, and D. Nan, "Emergency Load Shedding Strategy with Warning and Delay Time Based on Energy Storage," vol. 10, no. 4, pp. 28–41, 2025, doi: 10.23919/PCMP.2024.000090.

[2] X. Zhou, Y. Jiang, C. Yang, D. Xu, J. Tang, and K. Xie, "Stochastic Steady-State Security Assessment for Power System Operation by Chance Constrained Optimal Power Flow-Based Load Shedding," vol. 10, no. March, pp. 1–17, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.770213.

[3] C. Fang, Y. Qiu, Z. Cheng, D. Xiao, and H. Jia, "Enhancing the Robustness of Cyber – Physical Power Systems : Optical Configuration of Software-Defined Optical Networks," pp. 1–19, 2026.

[4] G. Paramo, M. D. B. S. Member, A. Bretas, S. Member, S. Meyn, and L. Fellow, "on Bayesian Filters and Spectral Clustering," *IEEE Open Access J. Power Energy*, vol. 12, no. December 2024, pp. 100–110, 2025, doi: 10.1109/OAJPE.2025.3531240.

[5] C. Li, K. Wen, R. Mo, C. Wang, S. Wang, and L. Lu, "Resilience Enhancement of Power Systems Integrated with Renewable Energy Considering the Participation of Proton Exchange Membrane Electrolyzers Under Severe Ice Disaster Conditions," pp. 1–26, 2026.

[6] J. Sun, J. Liu, Y. Liu, C. Li, and N. Zhi, "Research Article A Blocking Method for Overload-Dominant Cascading Failures in Power Grid Based on Source and Load Collaborative Regulation," vol. 2024, 2024, doi: 10.1155/2024/6314966.

[7] S. Maleki and S. Member, "Survey of Load-Altering Attacks Against Power Grids : Attack Impact , Detection , and Mitigation," *IEEE Open Access J. Power Energy*, vol. 12, no. March, pp. 220–234, 2025, doi: 10.1109/OAJPE.2025.3562052.

[8] Y. Wang, X. He, Z. Cheng, B. Wang, J. Che, and H. Zou, "Proactive Defense Approach for Cyber – Physical Fusion-Based Power Distribution Systems in the Context of Attacks Targeting Link Information Systems Within Smart Substations," pp. 1–24, 2025.

[9] A. A. Okasha, D. A. Mansour, A. B. Zaky, J. Suehiro, and T. F. Megahed, "A Novel IoT-Based Controlled Islanding Strategy for Enhanced Power System Stability and Resilience," pp. 3871–3894, 2024.

[10] A. P. Zhao, "Optimizing Cyber Insurance and Defense for Multi-Energy Systems Under False Data Injections," vol. 1, pp. 1–13, 2025, doi: 10.1049/rpg2.70011.

[11] A. P. W. B, M. Facta, and S. Handoko, *Improvement of Defense Scheme Operation by Considering Load Profile of Interbus*. Atlantis Press International BV, 2023. doi: 10.2991/978-94-6463-228-6.

[12] H. Fang *et al.*, "Coordinated Cyber – Physical Attack Strategies in Power Systems Considering Defense Resource Allocation and Emergency Dispatch Responses," pp. 1–26, 2026.

[13] R. A. N. Chen, H. Xu, L. I. Zhou, J. I. E. Cai, C. Xiong, and Y. Zhou, "Underfrequency Load Shedding Strategy With an Adaptive Variation Capability for Multi-Microgrids," *IEEE Access*, vol. 11, no. February, pp. 17294–17304, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3246088.

[14] J. Chukwunweike, "Coordinating PLC-based load shedding and variable- speed drives to prevent transformer overloading during industrial production peaks," vol. 6, no. 2, pp. 118–135, 2025.

[15] T. Madiba *et al.*, "Under-frequency load shedding of microgrid systems : a review," *Int. J. Model. Simul.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–27, 2021, doi: 10.1080/02286203.2021.1964061.

[16] E. K. Devyanti *et al.*, "Journal of Sustainable Innovation Analysis of Defense Scheme in OverLoad Shedding on 70kV," no. 20, 2024.

[17] S. Maleki, G. S. Member, E. V. Belmega, and S. Member, "Distribution System Reconfiguration to Mitigate Load Altering Attacks via Stackelberg Games," pp. 1–14.

[18] D. B. Widyantara, I. Garniwa, and F. H. Jufri, "Reliability Improvement of Defense Scheme Implementation Using Adaptive Load Shedding Based On System Strength Index," no. September, pp. 544–566, 2025.

[19] J. Segundo-ramírez, "Toward Adaptive Load Shedding Remedial Action Schemes in Modern Electrical Power Systems," no. October, pp. 111011–111033, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3322657.

[20] M. Yusril, I. Al, M. F. Hakim, and S. Djulihenanto, "Kajian Skema Baru Over Load Shedding Di Gitet Paiton," pp. 36–41.

[21] X. Deng and Y. Shen, "Coordinated Defense Strategies for Energy Storage Systems Against Cascading Faults in Extreme Grid Scenarios," 2026.

[22] T. N. Le, "Metaheuristic Optimization for PSI-Based Load Shedding and Voltage Stability in Islanded Microgrids," vol. 16, no. 4, pp. 38316–38323, 2026.
[23] W. H. Id, J. Yu, Z. Yuan, Z. He, J. H. Id, and M. Deng, "PLOS ONE An adaptive under-frequency optimal control strategy for power system combined pumped storage and under-frequency load shedding," pp. 1–30, 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0261093.
[24] T. Ba, "Dynamically adaptive method for under frequency load shedding protection scheme reconfiguration," vol. 207, no. January, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.107823.