

Pengaruh Nilai PIR dan Penggantian Elemen Resistor dengan DISP Aluminium terhadap GCB 420 KV

NURUL AMANDHA ADISTIA¹, JONI WELMAN SIMATUPANG²,
MAROJAHAN TAMPUBOLON³, FAISAL SAMSURI⁴

^{1,2,4}Study Program of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
President University

³Study Program of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Informatics,
Universitas Multimedia Nusantara
e-mail: joniwsmtmp@president.ac.id

Received 12 Desember 2022 / *Revised* 30 December 2022 / *Accepted* 6 Januari 2023

ABSTRAK

Penggunaan PIR pada GCB single phase dirancang sesuai klasifikasi kelas tegangannya, maka nilai PIR didesain berdasarkan desain GCB. Studi kasus yang dilakukan di PT XYZ yaitu nilai PIR di luar batas toleransi. Tujuan studi kasus ini untuk mengetahui pengaruh PIR terhadap GCB dengan nilai PIR yang tidak memenuhi kriteria, mengetahui elemen resistor diganti DISP dapat dijadikan solusi alternatif yang tepat, dan mengetahui nilai PIR dapat bertambah sehingga melebihi batas toleransi. Pengaruh nilai PIR sesuai kriteria dan melebihi kriteria memiliki perbedaan nilai berdasarkan simulasi PSCAD yaitu arus puncak dengan nilai PIR 417 Ω sebesar 1.1782kA, sedangkan nilai PIR 425 Ω sebesar 1.1589kA saat switch PIR menutup (0.0801s). Penggunaan DISP dapat dijadikan alternatif untuk mengurangi nilai PIR. Nilai PIR yang melebihi kriteria dipengaruhi faktor proses powder metallurgy, pemasangan, dan pengukuran PIR.

Kata kunci: Aplikasi PSCAD, DISP Aluminium, GCB, PIR, dan Powder Metallurgy

ABSTRACT

The utilization of PIR in the single phase GCB designed according to its voltage classification, therefore the value of PIR is related to the GCB design. A case study observed in XYZ company focused on the out of tolerance PIR value. The main purpose of this observation is to discover the out of criteria PIR value related to the behaviour of the GCB, to find out if the resistor element could be changed with DISP so that it is able to be an alternative solution, and also increase of the PIR value caused out of tolerance after being set. Based on PSCAD simulation, the effect of PIR value according to and out of criteria shown the different result in its peak current between 417 Ω and 425 Ω , those are 1.1782kA and 1.1589kA respectively when the PIR switch is closed (0.0801s). Utilization of DISP is most-likely able to be an alternative to reduce the PIR value. The out of criteria PIR value can be influenced by an amount of factor, such as powder metallurgy process, installation, and measurement.

Kata kunci: PSCAD Software, DISP Aluminium, GCB, PIR, and Powder Metallurgy

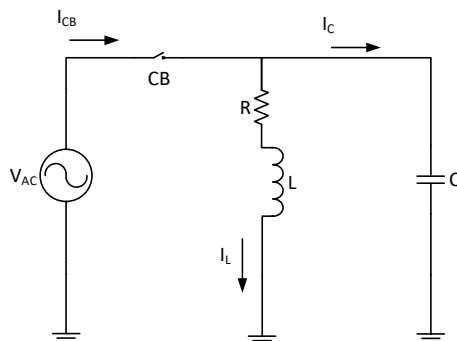
1. PENDAHULUAN

Energi listrik sangat vital dalam menunjang berbagai aktivitas manusia, baik dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam proses industri. Berbagai sumber energi primer dipergunakan untuk dapat membangkitkan energi listrik dalam memenuhi kebutuhan **(Adistia, dkk, 2020)**. Seiring berjalannya waktu, kebutuhan akan suplai listrik mulai merambah ke beberapa sektor seperti otomasi industri, *internet of things*, sistem pembayaran layanan umum seperti gas dan air, bahkan otomotif untuk mendukung program *clean energy* **(Aziz, dkk, 2020)(Samsuri, dkk, 2021)**. Oleh karenanya, diperlukan upaya untuk melakukan pengembangan dan pemeliharaan pembangkit tenaga listrik supaya kebutuhan listrik di masa depan terpenuhi. Diantara pemeliharaan yang diupayakan, kontrol beban melalui sistem *monitoring*, efisiensi transmisi dan energi yang berkaitan dengan instrumen-instrumen yang ada di lapangan dan juga proteksi sistem adalah penting untuk diperhatikan **(Ginting, dkk, 2018)**.

Energi listrik yang dibangkitkan di pusat-pusat pembangkit listrik dikirimkan ke pusat-pusat beban dengan menggunakan berbagai peralatan tegangan tinggi seperti transformator, saluran transmisi, peralatan isolasi, dan peralatan proteksi. *Circuit Breaker* (CB) adalah salah satu peralatan utama dalam sistem proteksi tenaga listrik. Dalam kondisi normal, CB mengisolasi gangguan dan menjaga keseluruhan sistem kelistrikan dari kerusakan yang luas. Oleh karena itu, kebutuhan CB yang handal menjadi sangat penting **(Janssen, dkk, 2014)**.

CB dapat dikelompokkan menurut medium pemadam busur api yang digunakan seperti minyak (*oil*), semburan udara (*air blast*), vakum, dan *Sulfir Hexaflouride* (SF_6). Masing-masing medium ini memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri. Kelebihan dari penggunaan SF_6 sebagai medium pemadam pada CB mencakup kekuatan dielektrik (*dielectric strength*) yang baik. Pada tekanan absolut, kekuatan dielektriknya mencapai 2 kali lipat kekuatan dielektrik udara, dan pada tekanan 3atm kekuatan dielektriknya sebanding dengan minyak isolasi. Selain itu, SF_6 juga memiliki konduktivitas panas yang baik, tidak beracun pada suhu di bawah $1000^{\circ}C$, tidak berbau, tidak mudah terbakar, dan memiliki karakteristik busur api-tegangan yang rendah. CB berbasis SF_6 dapat dikelompokkan ke dalam 3 kategori, yaitu: CB SF_6 bertekanan ganda (*double-pressure*), CB SF_6 *self-blast*, dan CB SF_6 *puffer-type*. Saat ini *circuit breaker* berbasis SF_6 adalah CB yang paling banyak dipakai untuk aplikasi pada tegangan tinggi **(Choonhapran, 2007)**.

Gambar 1 merupakan rangkaian ekuivalen saluran transmisi dengan reaktor *shunt*. Reaktor *shunt* biasanya digunakan untuk mengkompensasi arus reaktansi kapasitif yang diakibatkan oleh kapasitansi saluran transmisi atau kabel transmisi.



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen saluran transmisi dengan reaktor shunt

Kapasitansi yang besar ini terjadi pada penggunaan kabel tegangan tinggi AC seperti pada kabel bawah tanah atau kabel bawah laut **(Da Silva, dkk, 2009)**. Prinsip kerja dari reaktor

shunt adalah dengan membangkitkan arus reaktif induktif (I_L) dengan nilai yang sama besar atau lebih kecil dengan arus reaktif kapasitif (I_C), tetapi dengan fasa yang berlawanan. Pada saat aktivasi CB, reaktor *shunt* dapat membangkitkan komponen arus DC dengan besaran yang lebih besar dibandingkan dengan nilai arus AC selama periode transiennya. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya *Zero Missing Phenomenon* (ZMP) pada tahap energisasi sistem tenaga. Pada periode energisasi ini kabel transmisi belum terhubung dengan beban sehingga arus DC yang timbul tidak teredam dengan cepat dan bertahan dalam waktu beberapa detik dan mengakibatkan CB tidak dapat dibuka dengan aman jika terjadi gangguan pada tahap energisasi (Da Silva, dkk, 2009).

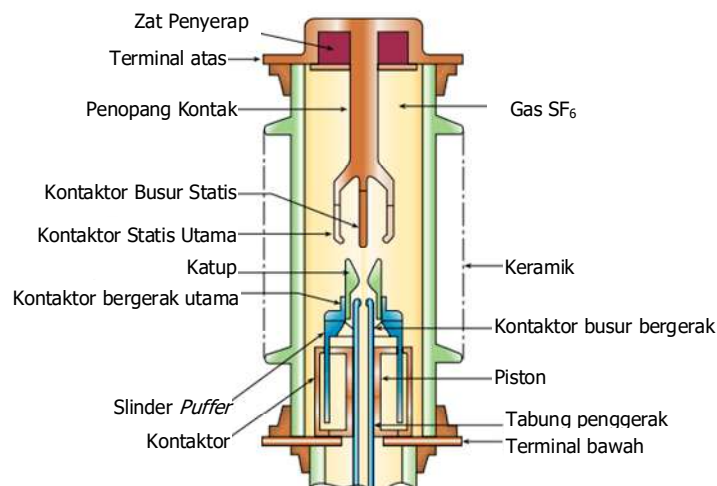
Salah satu solusi untuk mengatasi masalah yang timbul akibat ZMP adalah dengan menggunakan *Pre-Insertion Resistor* (PIR) (Gudmundsdottir & Holst, 2013) (He & Voelzke, 2016) (Da Silva, dkk, 2010). Peranan dari PIR adalah untuk meredam arus DC yang ada pada saat peralihan posisi CB. Besaran dari PIR ini harus dapat ditentukan dalam kondisi optimal pada batasan kriteria yang telah ditentukan oleh pembuat CB yang sedang digunakan.

Penelitian ini merupakan pengembangan lebih lanjut dari pemanfaatan penggunaan PIR untuk *Gas Circuit Breaker* (GCB) dengan *rating* tegangan 420kV pada PT XYZ. Tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh dari besaran nilai PIR yang digunakan dan penggunaan *Distance Piece* (DISP) untuk menyesuaikan nilai resistansi PIR yang digunakan. Artikel ini mendiskusikan mengenai penggunaan PIR, studi kasus yang ditinjau dan metoda yang digunakan dalam penelitian. Selanjutnya hasil simulasi juga akan ditampilkan disertai analisis dan kesimpulan dari hasil yang ditemukan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Gas Circuit Breaker

Gas Circuit Breaker (GCB) adalah peralatan yang digunakan untuk memutus dan menghubungkan peralatan tegangan tinggi pada sistem tenaga listrik. Ilustrasi sebuah GCB yang bersumber dari Crompton Greaves Ltd. Ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi GCB dengan medium SF₆

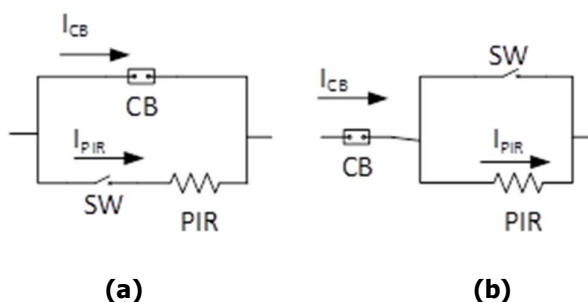
GCB memiliki dua grup kontakor, yaitu kontakor statis dan kontakor dinamis. Kontakor dinamis ini masih terhubung dengan peralatan mekanik untuk menggerakkan kontakor untuk membuka atau menutup. Dalam ilustrasi pada Gambar 2, GCB memiliki medium

pemadam busur api berbahan gas SF₆. Saat kontaktor dibuka, busur api akan terbentuk dan menghubungkan kontaktor statis dan kontaktor dinamis, walaupun secara fisik kedua kontaktor telah terpisah. Agar busur api padam, silinder *puffer* akan menekan gas SF₆ terhadap piston yang mengakibatkan terjadinya hembusan SF₆ yang cukup kuat. Setelah bergeser pada jarak tertentu, kekuatan dielektrik dari celah yang terbentuk sudah cukup untuk memadamkan busur api secara total. Dan pada saat itulah GCB terbuka atau terputus secara total.

Pada saat transisi dari *short circuit* ke *open circuit* dari GCB tersebut, timbul tegangan berlebih dan lonjakan arus awal (*inrush current*) sehingga GCB mengalami tekanan listrik pada periode tersebut (**Acharya & Machhar, 2015**). GCB dalam sistem tenaga diharapkan dapat beroperasi secara cepat dalam melakukan fungsinya. CB memiliki peran penting dalam perlindungan sistem tenaga untuk mengisolasi komponen yang rusak yang dapat menimbulkan resiko kerusakan sistem tenaga listrik seperti gangguan arus yang tinggi, gangguan pada konduktor dan kerusakan isolasi listrik (**Dehghanian & Popovic, 2015**).

2.2 Pre-Insertion Resistor

Pre-Insertion Resistor (PIR) dapat disusun dengan dua cara dalam hubungannya dengan CB. Pertama, dihubungkan secara seri dengan sebuah sakelar lalu dihubungkan secara paralel dengan CB atau yang kedua dihubungkan secara paralel dengan sakelar dan dihubungkan secara seri dengan CB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (**Munji, dkk, 2017**) (**Niu, dkk, 2020**).



Gambar 1. Rangkaian penggunaan *Pre-Insertion Resistor* dalam sistem tenaga dihubungkan secara (a) paralel dan (b) seri

Untuk memahami cara kerja dari PIR, maka perlu diasumsikan bahwa CB dalam keadaan tertutup/terhubung terlebih dahulu. Ketika ada gangguan (*fault/trip*), maka CB perlu segera membuka dalam batasan waktu yang ditentukan. Namun CB tidak bisa dibuka dengan aman jika terjadi ZMP seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Untuk mengatasi ZMP maka PIR digunakan sebagai peredam agar arus dapat menyentuh nilai nol dalam periode waktu yang singkat (8 – 12ms). Selanjutnya sakelar SW seperti pada Gambar 3 harus terhubung terlebih dahulu dalam waktu kurang dari 20ms, sehingga arus mengalir melalui PIR dan menyerap energi agar arus offset DC menjadi teredam. Dengan cara ini, PIR masuk ke sirkuit selama beberapa milidetik sebelum energi beban nyata. Setelah menyentuh nilai nol, maka CB dapat dibuka dengan aman. Jika CB pada awalnya dalam posisi terbuka, maka sakelar SW tertutup terlebih dahulu, sehingga arus mengalir melalui PIR. Setelah waktu yang ditentukan, CB akan menutup dan arus akan mengalir melalui CB.

Nilai PIR tidak dapat ditentukan secara sembarangan. Jika nilainya terlalu kecil, maka tidak dapat meredam komponen arus DC pada sistem. Sebaliknya, jika nilainya terlalu besar, maka PIR akan terlihat seperti rangkaian terbuka, sehingga tidak memiliki efek pada keseluruhan

sistem (Da Silva, dkk, 2009). Penentuan waktu *insertion* juga adalah hal yang penting untuk dipertimbangkan agar sistem dapat berfungsi secara optimum.

Minimal waktu penyisipan listrik (*insertion time*) dihitung berdasarkan konfigurasi yang digunakan pada rangkaian (Munji, dkk, 2017)(Niu, dkk, 2020). Beberapa fungsi PIR yang dimungkinkan terjadi dalam sistem transmisi adalah sebagai berikut.

1. *Overvoltage*, adalah peningkatan nilai efektif tegangan AC yang lebih besar dari 100% dari tegangan nominal, dan biasanya disebabkan oleh *switching* beban-beban besar dan energisasi bank kapasitor.
2. Transien atau gejala peralihan merupakan perubahan nilai tegangan atau arus, dimana dapat terjadi sesaat maupun dalam waktu tertentu (dalam orde mikrodetik) dari keadaan tunak (*steady state*).

Dengan kata lain, transien adalah perubahan variabel tegangan dan arus yang berlangsung saat peralihan dari kondisi stabil ke kondisi yang lain. Perubahan arus dan tegangan transien tidak berlangsung seketika dan membutuhkan waktu walaupun hanya dalam hitungan milidetik maupun mikrodetik. Penyebabnya dapat dari lingkungan ataupun factor internal seperti *switching* (Prayitno, dkk, 2015).

2.3 Studi Kasus

Pada penelitian ini, kasus yang akan ditinjau adalah GCB SF₆ dengan rating tegangan 420kV dan tegangan nominal 400kV. GCB ini termasuk dalam klasifikasi tegangan ekstra tinggi sehingga diperlukan penyisipan resistor atau disebut dengan *Pre-Insertion Resistor* (PIR). Jenis atau tipe elemen resistor yang digunakan yaitu ASW12725 yang didesain untuk tegangan tinggi yang dibuat oleh SUNGSIL Electronics. Resistor ini termasuk dalam kelompok resistor berbahan dasar keramik yang cocok untuk aplikasi tegangan tinggi. Setiap satu elemen resistor pada PIR memiliki nilai $5 \pm 0.55 \Omega$. Dalam satu kutub GCB terdapat 80 elemen resistor. Dimana kriteria yang ditetapkan berdasarkan standar manufaktur yaitu $400 \pm 5\% \Omega$, dengan rentang resistansi $380 \Omega - 420 \Omega$.

Kasus yang ditemukan di PT XYZ para proyek GCB 420kV dengan tipe *single phase* atau *single pole* adalah didapatinya salah satu *pole* GCB yang memiliki hasil pengukuran PIR yang melebihi kriteria yang sudah ditentukan berdasarkan nilai desain perhitungan. Agar nilai PIR memenuhi kriteria, maka *Distance Piece* (DISP) digunakan. DISP adalah komponen yang berbahan dasar aluminium yang dibuat menyerupai resistor dalam segi bentuk, volume, dan ukuran. Karena bahannya terbuat dari aluminium, maka DISP memiliki konduktivitas listrik dua kali lebih besar dibandingkan dengan tembaga dengan perbandingan berat yang sama. Oleh karena itu sangat cocok digunakan dalam kabel transmisi listrik ataupun penghantar listrik (Kasli et al., 2020). DISP biasanya digunakan untuk menapis suatu jarak atau *gap* pada suatu penggabungan bagian antar konduktor. Dalam penelitian ini, satu elemen PIR digantikan oleh satu DISP.

Oleh karena itu, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh dari PIR terhadap GCB jika memiliki nilai desain di luar kriteria (terlalu besar atau terlalu kecil)
2. Mengetahui efektivitas dan resiko penggunaan DISP berbahan aluminium yang dapat menggantikan susunan elemen resistor pada PIR.

3. Menganalisa faktor-faktor yang berpotensi menyebabkan nilai elemen resistor dapat berubah menjadi lebih besar dari batas toleransi yang sudah ditentukan.

2.4 Simulasi dan Wawancara

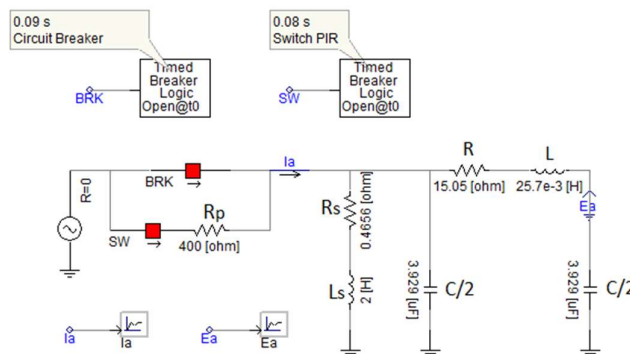
Untuk menjawab tujuan di atas, maka dilakukan simulasi dengan menggunakan *Power Systems Computer Aided Design* (PSCAD). PSCAD digunakan oleh banyak kalangan yang mempelajari utilitas sistem tenaga seperti peneliti, produsen, dan konsultan. Perangkat lunak ini dapat digunakan dalam perencanaan, pengembangan konsep-konsep baru, pengujian ide, untuk memahami apa yang terjadi ketika peralatan mengalami kegagalan, juga digunakan untuk komisioning, penyusunan spesifikasi dalam dokumen tender, serta pengajaran dan penelitian.

Metode simulasi yang digunakan untuk membuktikan bagaimana pengaruh nilai PIR yang tidak sesuai dengan nilai desain yang sudah ditentukan dan pengaruh penggunaan DISP berbahan aluminium untuk menggantikan satu elemen resistor. Simulasi ini dilakukan dengan membuat skematik atau pemodelan dengan PSCAD, kemudian menganalisa hasil yang diperoleh dari parameter-parameter yang digunakan terlebih dahulu. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data yang diperoleh dari referensi **(Da Silva, dkk, 2009)**.

Nilai yang diperoleh didasarkan pada asumsi kabel yang digunakan adalah sepanjang 50km dengan *rating 400kV single core*. Kabel ini memiliki kapasitansi ekuivalen $C/2 = 3.929\mu\text{F}$, induktansi ekuivalen $L = 25.7\text{mH}$, dan resistansi total ekuivalen $R = 15.05\Omega$.

Sementara itu, untuk reaktor *shunt* dimodelkan dengan elemen induktor dan resistor. Nilai induktansi yang digunakan adalah 2H. Dengan menggunakan referensi yang sama, nilai resistansi ekuivalennya adalah 0.2328Ω per 1H, maka nilai resistansi ekuivalen untuk reaktor yang digunakan adalah 0.4656Ω , dalam hal ini hubungan antara resistansi dan induktansi dianggap sebagai hubungan linear.

Kabel transmisi yang digunakan dimodelkan dengan menggunakan rangkaian ekuivalen model "pi". Reaktor *shunt* dihubungkan secara parallel dengan model transmisi "pi", sementara CB dihubungkan secara parallel dengan PIR bernilai 400Ω . Rangkaian ekuivalen dari sistem tenaga ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 2. Model sistem tenaga dengan reaktor shunt dan transmisi model "pi"

Parameter yang ditinjau di dalam simulasi ini adalah arus yang mengalir melalui reaktor *shunt* arus yang mengalir melalui CB dan arus yang mengalir melalui PIR. Tegangan pada CB

dan PIR juga akan ditinjau dalam simulasi ini. Untuk arus yang mengalir melalui CB akan ditinjau dalam dua kondisi yaitu sebagai berikut.

1. Komponen DC dalam kondisi maksimum dengan menggunakan atau tanpa menggunakan PIR
2. Tegangan dalam kondisi switching *overvoltage* dengan menggunakan atau tanpa menggunakan PIR

Variabel yang digunakan dalam simulasi untuk menjawab dan menjelaskan rumusan masalah adalah dengan membuat beberapa simulasi dengan kondisi komponen DC maksimum dan maksimum *switching overvoltage*, diantaranya sebagai berikut.

1. Menggunakan nilai PIR yang berbeda-beda (terlalu kecil dan terlalu besar) yaitu dengan menggunakan batas toleransi $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 50\%$, dan $\pm 75\%$.
2. Simulasi untuk kondisi tanpa PIR, PIR *on criteria*, dan nilai PIR *out of criteria*.
3. Simulasi dengan waktu pengaturan PIR atau *Pre-Insertion Time* (PIT) yang berbeda-beda. Simulasi akan dilakukan dengan interval switch PIR dan kontak utama CB 5ms, 8ms, 10ms, 12ms, 15ms, dan 20ms dengan menggunakan PIR yang sesuai kriteria dan juga tanpa PIR.
4. Simulasi untuk keadaan satu elemen PIR yang sudah diganti dengan DISP aluminium. Dalam hal ini nilai total PIR tanpa pergantian elemen disesuaikan dengan pengukuran PIR yang telah diganti DISP aluminium.

Pada praktiknya, perbedaan perilaku rangkaian RLC sederhana berbeda dengan sistem kabel/reaktor yang digunakan di lapangan. Sebagai contoh, dalam fenomena ZMP, nilai tegangan lebih switching bergantung pada nilai tegangan pada saat menghubungkan sistem kabel/reaktor. Untuk menghindari fenomena nol hilang (ZMP), sambungan harus dilakukan saat tegangan berada pada puncaknya, sedangkan untuk menghindari tegangan lebih switching, sambungan harus dibuat ketika tegangan nol (Da Silva, dkk, 2009).

Oleh karena itu pada penelitian ini, dilakukan simulasi dalam dua kondisi yang berbeda. Yaitu pada saat komponen DC maksimum dimana penyambungan dilakukan saat tegangan berada pada nilai nol dan pada saat maksimum *switching overvoltage* dimana penyambungan dilakukan pada saat nilai tegangan dalam kondisi maksimum. Parameter yang digunakan di dalam simulasi dengan menggunakan aplikasi PSCAD ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen dan nilai parameter yang digunakan dalam simulasi

No.	Nama komponen	Nilai parameter
1.	Sumber tegangan satu fasa	400kV (nominal tegangan)
2	<i>Time logic</i> kontak CB (BRK)	0.09s (90ms)
3	<i>Time logic</i> sakelar PIR (SW)	0.08s (80 ms)
4	Reaktor <i>shunt</i>	L = 2H, R = 0.4656 Ω
5	Pemodelan Kabel 50km	R = 15.05 Ω , L = 25.7mH, C/2 = 3.929 μ F

Dalam mengatur waktu switch PIR digunakan 0.08s dan kontak CB 0.09s. Pengaturan waktu tersebut disesuaikan dengan waktu rata-rata CB closing operation berdasarkan masalah

pada studi kasus. Interval waktu yang digunakan yaitu 10ms, dimana kriteria yang diterapkan berdasarkan standar manufaktur yaitu 8ms - 10ms.

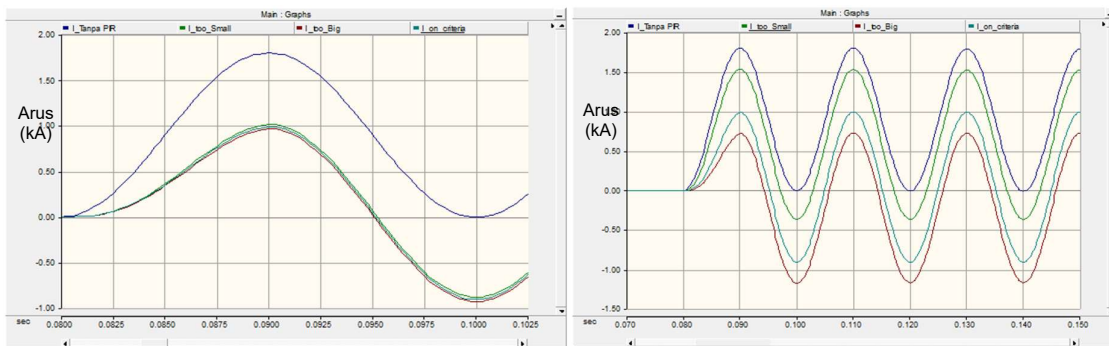
Selain menggunakan simulasi, wawancara dengan pihak PT XYZ berkaitan dengan objektivitas dari studi kasus ini juga dilakukan, terutama dalam menganalisa mengenai DISP berbahan aluminium yang dapat menggantikan elemen resistor untuk mengurangi nilai tahanan pada PIR yang melebihi kriteria. Begitu pun dengan hal yang memengaruhi perubahan nilai PIR yang dapat melebihi batas toleransi yang telah ditentukan. Selain mengacu pada data dan hasil pengukuran aktual di PT HPSI, juga dilakukan studi literatur dari jurnal, buku, *website* yang relevan dan standar internasional yang digunakan yaitu IEC.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Simulasi Arus yang Melalui CB

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui kondisi arus yang melalui reaktor shunt dengan nilai PIR yang berbeda-beda yaitu tanpa menggunakan PIR, sesuai dengan kriteria, terlalu kecil (*too small*) dan terlalu besar (*too big*) dengan waktu switch PIR 0,08 s dan kontak CB 0,09 s.

Gambar 3 menunjukkan hasil simulasi nilai PIR dengan toleransi 5% dan 75%. Masing-masing grafik menunjukkan nilai arus dalam satuan kA pada sumbu y dan waktu pada sumbu x.



Gambar 3. Hasil simulasi arus yang mengalir melalui reaktor *shunt* dengan (a) toleransi PIR $\pm 5\%$ dan (b) toleransi PIR $\pm 75\%$

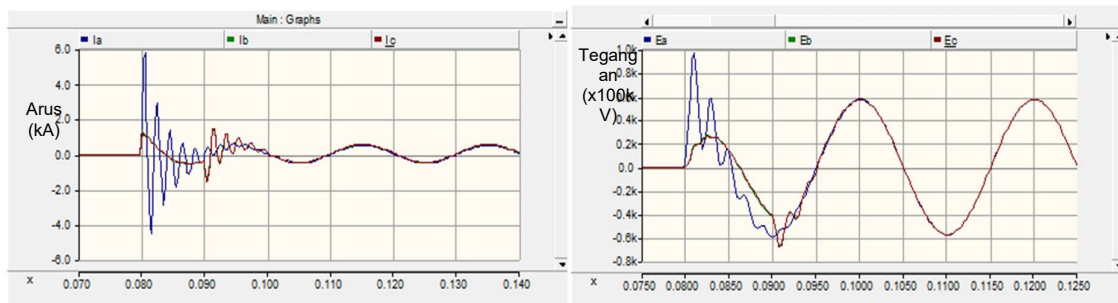
Dari hasil tersebut diperoleh bahwa jika PIR tidak digunakan, arus puncaknya akan lebih besar dibandingkan dengan jika menggunakan PIR. Nilai puncak dari kondisi tanpa PIR adalah 1.7963kA saat 0.09s dibandingkan dengan sekitar 1kA jika menggunakan PIR. Selain dari nilai arus puncak yang tinggi, arus pada simulasi tanpa PIR juga menunjukkan terjadinya ZMP di mana arus tidak melewati nilai nol, sementara jika menggunakan PIR ZMP tidak terjadi.

Jika menggunakan nilai PIR dengan nilai toleransi yang lebih tinggi, yaitu $\pm 75\%$ di mana nilai PIR minimum menjadi 100Ω dan nilai PIR maksimum menjadi 700Ω , juga menunjukkan perbedaan nilai arus yang signifikan. Nilai minimum dari PIR ini disebut sebagai kondisi PIR *too small*, dan sebaliknya nilai maksimum dari PIR dianggap sebagai kondisi PIR *too large*. Saat nilai PIR minimum digunakan, nilai arus terlihat mendekati nilai tanpa PIR dengan nilai puncak 1,52kA pada saat 0.09s. Sementara saat nilai PIR maksimum digunakan nilai puncak arus hanya berada di sekitar 0.75kA. Dari grafik ini dapat disimpulkan bahwa nilai arus akan semakin kecil ketika nilai PIR semakin naik. Dengan asumsi *trend* yang sama, maka jika nilai PIR terus dinaikkan akan berpotensi juga untuk menyebabkan terjadinya ZMP.

3.2 Simulasi Kondisi Maksimum *Switching Overvoltage* dan Komponen DC

Kondisi maksimum *switching overvoltage* yaitu dilakukan pada saat tegangan berada di titik puncak atau maksimum. Simulasi yang dilakukan menggunakan waktu rata-rata hasil pengoperasian GCB yaitu waktu switch PIR pada 0.08s dan kontak CB 0.09s. Dengan nilai PIR sesuai kriteria yaitu 400 Ω , sedangkan yang lebih dari kriteria (*out of criteria*) yaitu 425 Ω sesuai dengan hasil aktual pengukuran PIR pada GCB, dan untuk tanpa menggunakan PIR yaitu diberikan nilai $R = 0 \Omega$.

Dari hasil simulasi pada Gambar 4 diperoleh hasil bahwa nilai arus tanpa PIR dan menggunakan PIR memiliki perbedaan yang signifikan dengan arus puncak yang melalui CB pada waktu 0.0805s yaitu sebesar 5.649 kA jika PIR tidak digunakan.

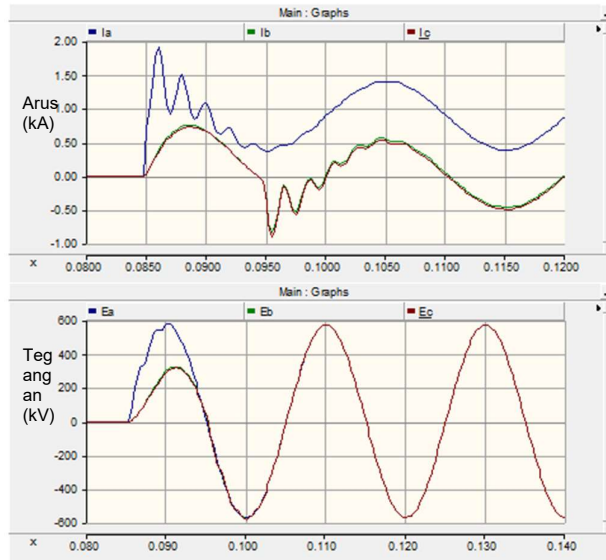


Gambar 4. Hasil simulasi dengan PIR sesuai kriteria, tanpa PIR, dan PIR lebih dari kriteria pada simulasi arus (kiri) simulasi tegangan (kanan)

Dari hasil simulasi kondisi komponen DC maksimum, diperoleh hasil bahwa dalam kondisi tersebut dan tanpa menggunakan PIR, arus puncak mengalami lonjakan lebih tinggi saat diawal pengoperasian pada 0.0859s yaitu sebesar 1.8997kA. Hasil arus puncak dengan menggunakan PIR 400 Ω (*on criteria*) sebesar 0.3614kA dan dengan PIR 425 Ω (*out of criteria*) yaitu sebesar 0.3434 kA.

Terlihat bahwa nilai arus puncak dengan menggunakan PIR yang *on criteria* arus lebih besar dibandingkan dengan arus puncak dengan PIR *out of criteria* hal ini sesuai dengan fungsi resistor untuk menghambat arus, akan tetapi jika nilai PIR melebihi kriteria terlalu jauh dapat terjadi hal lain seperti *zero missing phenomenon* karena arus semakin ke arah sumbu negatif. Selain itu, beberapa hal terjadi saat simulasi tanpa PIR diantaranya terjadi transien arus selama 12ms, dan arus memiliki beban sebesar 0.528kA mulai saat 0.10s dimana dalam sistem tersebut belum dihubungkan ke beban sesungguhnya seperti trafo untuk konsumen. Begitupun hasil tegangan puncak pada simulasi sistem tersebut sebesar 575.88kV lebih tinggi jika dibandingkan dengan tegangan rata-rata setelah kontak CB menutup dan tidak ada *ramp up* tegangan.

Sedangkan hasil tegangan dengan menggunakan PIR 400 Ω dan 425 Ω , tegangan terjadi *ramp up* yaitu tegangan tidak langsung melonjak naik seperti tanpa menggunakan PIR. Hal lain yang terjadi pada penggunaan PIR 400 Ω dan 425 Ω , masih terjadi transien arus selama 10ms saat kontak CB menutup atau *short circuit*. Hasil simulasi arus dan tegangan pada kondisi maksimum komponen DC dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil simulasi arus dan tegangan dengan PIR sesuai kriteria (biru), tanpa PIR (hijau), dan PIR lebih dari kriteria (merah)

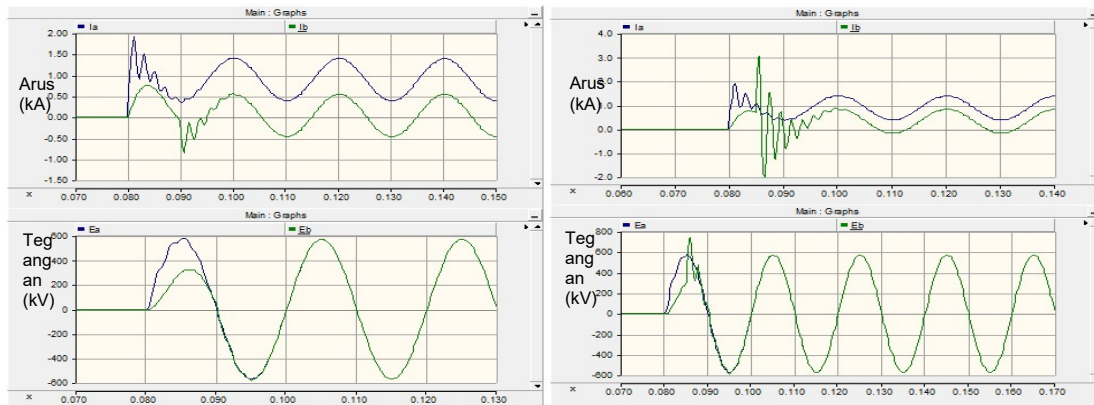
3.3 Simulasi Berdasarkan Perbedaan *Pre-Insertion Time* (PIT)

Pada simulasi ini dilakukan pengaturan waktu yang berbeda-beda untuk kontak CB, sementara untuk sakelar PIR dilakukan pada waktu 0.08s. Adapun pengaturan waktu untuk kontak CB adalah 5, 8, 10, 12, 15, dan 20ms. Hal ini bertujuan untuk dapat mengetahui apakah dengan interval waktu PIR terhadap kontak CB (*pre-insertion time*) yang tidak sesuai dengan standar *manufacturing* yaitu 8ms - 12 ms, dapat memengaruhi hasil simulasi, dimana parameter dan nilai PIR yang digunakan sama dari kondisi simulasi sebelumnya. Disini simulasi dilakukan untuk nilai PIR 400 Ω dan tanpa menggunakan PIR ($R = 0\Omega$).

Dari hasil simulasi diperoleh hasil bahwa tanpa menggunakan PIR, semua hasil simulasi sama, tergantung pada titik ukur sampling arus maupun tegangan. Sebagai contoh, pada kondisi PIT 5ms, arus puncak sebesar 1.8477kA pada waktu 0.0808s dan hasil tegangan yaitu 568.76kV dengan karakteristik tegangan tidak terjadi *ramp up*. Sedangkan hasil simulasi dengan menggunakan PIR diperoleh hasil yang berbeda-beda di setiap pengaturan waktu yang digunakan, yaitu sebagai berikut.

1. Dengan PIT 5ms, hasil simulasi arus puncak saat diawal switch PIR tidak ada lonjakan akan tetapi saat kontak CB menutup yaitu 0.0853s, arus puncak melonjak sampai 3.022kA, nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa menggunakan PIR. Selain itu terjadi transien arus selama 15ms. Begitu pun hasil tegangan puncak saat 0.0857s dengan menggunakan PIR, terjadi *overvoltage* dimana tegangan mencapai 713.25kV.
2. Dengan PIT 8ms, terjadi transien arus selama 12ms serta saat kontak CB menutup yaitu pada waktu 0.0891s, arus puncak berada pada sumbu negatif yaitu sebesar -0.982kA. Hasil tegangan dengan PIR 400 Ω terjadi *ramp up*, jadi tegangan tidak langsung melonjak dan pada saat kontak CB sedikit terjadi transien (tidak gelombang normal).
3. Dengan PIT 10ms, hasil simulasi arus dapat dikatakan ideal daripada di kondisi 8ms - 12 ms lainnya. Transien dapat diredam selama 10 ms, begitu pun hasil tegangan terjadi *ramp up* daripada tanpa menggunakan PIR.
4. Dengan PIT 12ms, hasil arus puncak saat kontak CB menutup yaitu 0.092s memiliki nilai puncak bawah paling tinggi dibanding PIT sesuai standar manufaktur yaitu 8ms - 12 ms. Hasil tegangan juga terjadi transien selama 4ms yaitu 0.092s - 0.096s.

5. Dengan PIT 15ms, hasil simulasi arus yaitu 0.095s - 0.14s terjadi transien selama 9ms. Hasil tegangan dapat dilihat sedikit terjadi pergeseran fasa dalam waktu 10ms (0.09s - 0.1s) dari hasil tanpa menggunakan PIR.
6. Dengan PIT 20ms, hasil simulasi arus puncak saat kontak CB menutup yaitu 0.1006s terjadi lonjakan arus yang lebih tinggi daripada tanpa menggunakan PIR, transien terjadi dalam waktu 14ms. Hasil simulasi tegangan puncak dapat dilihat sedikit terjadi pergeseran fasa dari hasil tanpa menggunakan PIR, serta pada detik 0.10s - 0.15s terjadi sedikit transien selama 5 ms. Gambar 6 menunjukkan sampel hasil simulasi dengan waktu PIT yang berbeda yaitu sesuai standar dan di luar standar manufaktur.

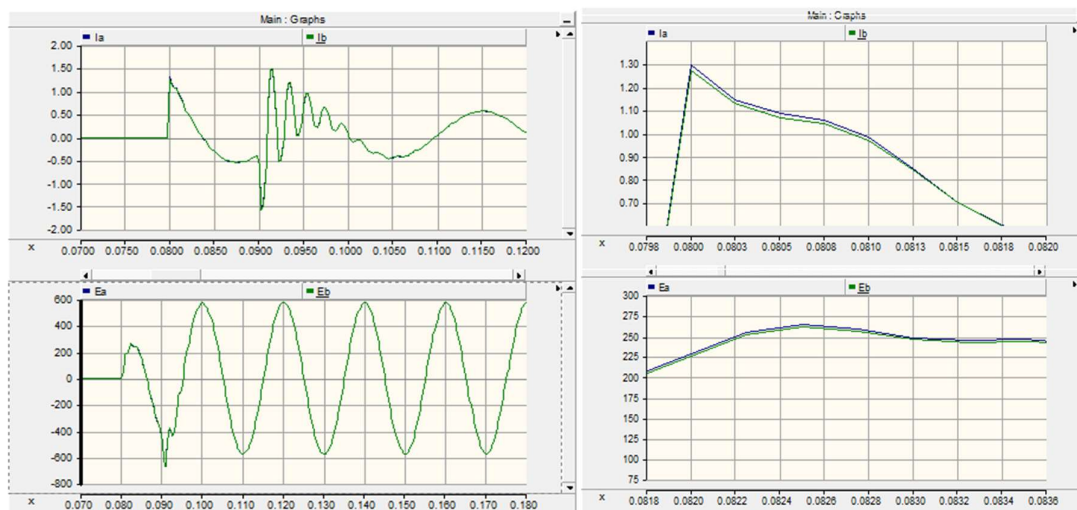


Gambar 6. Hasil simulasi dengan interval waktu (PIT) 10 ms (kiri) dan 5 ms (kanan)

3.4 Analisis Elemen Resistor diganti DISP Aluminium pada PIR sebagai Solusi Alternatif

Dalam simulasi pada bagian ini hanya dilakukan pada kondisi maksimum switching overvoltage untuk membuktikan bahwa perbedaan nilai 1Ω PIR yang dimasukkan dalam simulasi hasilnya akan berubah, sama halnya jika dilakukan pada kondisi maksimum komponen DC. Simulasi ini tidak mewakili bahan material seperti satu elemen DISP aluminium yang dipasang pada blok PIR hanya berdasarkan nilai pengukuran. Pengukuran dilakukan setelah satu elemen resistor pada blok PIR diganti dengan satu elemen DISP berbahan aluminium, sebagai langkah yang dilakukan untuk mengurangi nilai resistor pada PIR agar diperoleh hasil PIR sesuai dengan kriteria. Jadi DISP aluminium tersebut, dalam simulasi mengganti nilai resistor pada model dari 425Ω (*out of criteria*) menjadi 417Ω sesuai dengan hasil pengukuran yang telah dilakukan secara langsung pada PIR yang sudah dipasang kembali (setelah diganti dengan DISP tersebut). Dalam simulasi ini menggunakan model dan parameter komponen yang sama dengan simulasi sebelumnya, yang membedakan pada nilai PIR yang digunakan.

Dari simulasi seperti Gambar 7, diperoleh hasil jika nilai PIR sesuai dengan kriteria dan nilai PIR di luar batas toleransi terlihat tidak jauh berbeda dari hasil simulasi arus maupun tegangan, akan tetapi hasilnya ada perbedaan semisal pada waktu 0.0801s diperoleh arus puncak sebesar 1.1782kA dengan PIR 417Ω , sedangkan untuk PIR 425Ω diperoleh arus sebesar 1.1589kA. Begitupun dengan hasil simulasi tegangan puncak pada waktu 0.0824s diperoleh hasil 261.41kV dengan nilai PIR 417Ω , sedangkan untuk nilai PIR 425Ω , diperoleh hasil sebesar 258.16kV. Saat kontak CB terhubung, yaitu pada waktu 0.09027s terjadi penghambatan arus selama 10ms dengan hasil maksimum arus yaitu -1.5233kA (417Ω) dan -1,5575 kA (425Ω). Hasil tegangan pada saat kontak CB menutup yaitu pada saat waktu 0.09117s terjadi *overvoltage* yaitu -611.05kV (417Ω) dan -612.86kV (425Ω) serta terjadi transien tegangan selama 5ms.



Gambar 7. (a) Hasil simulasi kondisi maksimum *switching overvoltage* dengan PIR hasil pengukuran setelah diganti DISP aluminium ($R = 417\Omega$) dan PIR *out of criteria* ($R = 425\Omega$), (b) perbesaran hasil simulasi (a)

3.5 Perubahan Nilai Elemen Resistor yang Dapat Melebihi Batas Toleransi

Berdasarkan hasil wawancara, nilai PIR dapat berubah menjadi lebih besar dari nilai toleransi yang sudah ditentukan yaitu dapat dilihat dari segi pembuatan elemen resistor dengan proses *powder metallurgy*, dimana proses ini membuat permukaan elemen resistor berpori. Sesuai keadaan yang telah terjadi jika dalam penyimpanan elemen resistor tersebut tidak memerhatikan kondisi lingkungan terutama kelembaban dapat memengaruhi pertambahan nilai elemen resistor sehingga dapat berpengaruh terhadap nilai PIR setelah di pasang pada GCB. Beberapa faktor lainnya yang terjadi dalam pengukuran resistansi di mana elemen tersebut dihubungkan dalam satu blok PIR dapat dimungkinkan dari segi pemasangan atau proses *assembly* PIR tersebut serta akibat panas yang dihasilkan akibat beroperasinya GCB secara terus menerus.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan data referensi dan hasil simulasi secara umum, diketahui bahwa penggunaan PIR pada GCB 420kV sangat efisien untuk mengurangi lonjakan arus maupun tegangan saat pengoperasian kontak PIR maupun kontak CB tertutup. Maka berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan nilai PIR yang berbeda-beda terhadap arus yang masuk ke GCB dapat dilihat dengan jelas perbedaannya, yaitu tanpa menggunakan PIR sebesar 1.7963kA, sedangkan dengan PIR sesuai kriteria dengan 400Ω adalah sebesar 0.9845kA. Berdasarkan hasil simulasi juga ditemukan bahwa jika tidak menggunakan PIR, transien arus maupun tegangan berlangsung dalam waktu yang lebih lama jika dibandingkan dengan hasil dengan menggunakan PIR, misalnya pada hasil simulasi kondisi maksimum *switching overvoltage* tanpa menggunakan PIR terjadi transien arus selama 20ms, sementara dengan PIR hanya selama 10ms. Pada kondisi maksimum komponen DC tanpa menggunakan PIR, terjadi *zero missing phenomenon* (ZMP) dan memiliki beban arus. Hasil simulasi dengan *pre-insertion time* (PIT) yang tidak sesuai dengan standar manufaktur yaitu 8ms - 12ms memiliki pengaruh hasil simulasi terhadap arus maupun tegangan. Hasil penggunaan PIR sesuai dengan data studi kasus tidak terlalu signifikan, akan tetapi ada perbedaan nilai yang dihasilkan yaitu hasil arus puncak dengan PIR 417Ω sebesar 1.1782kA, sedangkan dengan PIR 425Ω sebesar 1.1589kA pada waktu 0.081 s.

Dari simulasi yang dilakukan juga diperoleh kesimpulan bahwa penggunaan DISP berbahan aluminium dapat dijadikan solusi alternatif untuk menggantikan elemen resistor jika nilai PIR melebihi kriteria. Perubahan nilai resistor yang melebihi batas toleransi dari yang sudah ditentukan dapat terjadi dikarenakan faktor dari elemen tersebut seperti proses metalurgi, proses pemasangan atau *assembly* PIR dan pengukuran setelah dilakukan pengoperasian secara terus menerus.

DAFTAR RUJUKAN

- Acharya, M. B. M., & Machhar, V. G. (2015). A Review On Pre Insertion Resistor Switch Mechanism. *Journal, Int. Eng. O F On, A Rev. Detect. Obs.*, 4(1), 1–11.
- Choonhapran, P. (2007). *Applications of High Voltage Circuit-Breakers and Development of Aging Models*. (Dr.-Ing), Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Dehghanian, P., & Popovic, T. (2015). *Assessing the Impact of Power System Topology Control on Circuit Breaker Reliability and Electric Safety*. Paper presented at the Electrical Safety Workshop, Kentucky, USA.
- Greaves.Ltd, C. *SF₆-Gas Circuit Breakers*. Retrieved from: <https://5.imimg.com/data5/TV/QW/MY-1842773/gas-circuit-breaker.pdf>
- Gudmundsdottir, U. S., & Holst, P. B. (2013). *Solving Zero-Miss with Cable Energisation at Voltage Peak, Based on Insulationcoordination Study Results*. Paper presented at the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, Canada.
- He, L., & Voelzke, R. (2016). *Effects of pre-insertion resistor on energization of compensated lines*. Paper presented at the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, USA.
- Janssen, A., Makareinis, D., & Carl-Ejnar. (2014). International Surveys on Circuit-Breaker Reliability Data for Substation and System Studies. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 29(2), 808-814. doi:10.1109/TPWRD.2013.2274750
- Kasli, E., Dewi, V. R., & H. Mazlina. (2020). Analisis Nilai Hambatan Jenis Aluminium Berdasarkan Panjang Kawat Yang Berbeda. *J. Pendidik. Fis. dan Teknol.*, 6(1). doi:10.29303/jpft.v6i1.1455.
- Munji, K., Horne, J., & Ribecca, J. (2017). Design and Validation of Pre-Insertion Resistor Rating for Mitigation of Zero Missing Phenomenon. *Paper presented at the Int. Conf. Power Syst. Transients, Seoul, Republic of Korea*
- Niu, B., Xu, Y., Ma, F., Zhou, X., Chen, L., & Wei, Y. (2020). Reliability Analysis of Pre-insertion Resistors for EHV/UHV SF₆ Circuit Breakers. *Paper presented at the 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China*.

- Prayitno, A. A., Suhendar, S., & Herudin, H. (2015). Analisis Arus dan Tegangan Transien Akibat Pelepasan Beban pada Sis Primer Transformer Unit 5, Unit 6, dan Unit 7 Suralaya. *SETRUM*, 2(1), 30-41.
- Silva, F. F. d., Bak, C. L., Gudmundsdottir, U. S., Wiechowski, W., & Knardrupgard, M. R. (2010). Methods to Minimize Zero-Missing Phenomenon. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4), 2923-2930. doi:0.1109/TPWRD.2010.2045010
- Silva, F. F. D., Bak, C. L., Gudmundsdóttir, U. S., Wiechowski, W., & Knardrupgård, M. R. (2009). Use of a pre-insertion resistor to minimize zero-missing phenomenon and switching overvoltages. *Paper presented at the 2009 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. PES '09, Calgary, AB, Canada*.
- Aziz, Mochammad., Marcellino, Y., Rizky, I. A., Ikhwanuddin, S. A., & Simatupang, J. W. (2020). Studi Analisis Perkembangan Teknologi Dan Dukungan Pemerintah Indonesia Terkait Mobil Listrik. *TESLA Universitas Tarumanegara*, 22(1), 45 – 46.
- Adistia, N. A., Nurdiansyah, R. A., Fariko, J., Vincent, & Simatupang, J. W. (2020). Potensi Energi Panas Bumi, Angin, Dan Biomassa Menjadi Energi Listrik di Indonesia. *TESLA Universitas Tarumanegara*, 22(2), 105 – 106.
- Ginting, S., Simatupang, J. W., Bukhori, I., & Kaburuan, R. E. (2018). Monitoring of Electrical Output Power-Based Internet of Things for Micro-Hydro Power Plant. *International Conference on Orange Technologies*. doi:10.1109/ICOT.2018.8705786
- Samsuri, F., Simatupang, J. W., Putra, R. R., & Wahid, A. (2021). Preferensi Masyarakat Terhadap Sistem Prabayar dan Pascabayar untuk Jaringan Gas Rumah Tangga di Wilayah Cikarang. *Serambi Engineering*, 6(2), 1932 – 1933.