

# ANALISIS INRUSH CURRENT DAN TRANSIEN TEGANGAN LEBIH TRANSFORMATOR 292 MVA DENGAN PENGUJIAN *LINE CHARGING*: STUDI KASUS PADA PLTGU CILEGON

Rizky Drajat Prabowo<sup>\*)</sup> dan Badaruddin

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana  
Jl. Meruya Selatan, Kembangan, Jakarta Barat 11650, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: rizkydrajatprabowo@gmail.com

## Abstrak

Kehandalan sistem dan peralatan yang memberikan *supply* listrik kepada konsumen menjadi fokus utama dalam upaya penyediaan energi listrik. Untuk memastikan kehandalan tersebut dilakukan serangkaian pengujian dalam sistem kelistrikan, salah satu pengujian tersebut adalah pengujian *line charging*. Pengujian *line charging* adalah kondisi dimana mesin pembangkit beroperasi *isolated* untuk memberikan *supply* ke saluran transmisi, peralatan transmisi dan ke beban, dalam situasi yang dikondisikan. Peralatan penting yang memiliki kemungkinan kegagalan dalam pengujian tersebut adalah transformator. Dampak operasi transformator dalam pengujian *line charging* adalah terjadinya *inrush current* dan *transient* tegangan lebih. Hal tersebut memiliki potensi mengurangi kehandalan transformator. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui nilai *inrush current*, *transient* tegangan lebih dan mengetahui dampaknya terhadap transformator dari data hasil simulasi pemodelan dan data aktual pengujian *line charging*. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan *inrush current* dan *transient* tegangan lebih terbesar diperoleh dari pemodelan dengan metode *switching* pada 52L dengan nilai 6,56 kA dan 307,3 kV. Nilai *transient* tegangan lebih dari hasil simulasi menunjukkan hasil 2,5 kali dari tegangan nominalnya, hal ini jika dilakukan terus menerus akan menyebabkan kegagalan operasi transformator. Metode yang paling efektif untuk menurunkan *inrush current* adalah metode *switching* pada 52G dengan *sequential switch*, dengan metode ini didapatkan penurunan *inrush current* sebesar 83,6 % dari metode 52G.

*Kata Kunci* : *Line charging, transformator, inrush current, transient tegangan lebih*

## Abstract

*The reliability of systems and equipment that provide electricity supply to consumers is the main focus in efforts to provide electrical energy, to ensure that reliability, a series of tests are carried out in the electrical system, one of these tests is line charging testing, line charging testing is a condition where the generating machine operates isolated for provide supply to transmission lines, transmission equipment and to loads, under conditioned situations. The important equipment that has the possibility of failure in the test is the transformer. The impact of transformer operation in line charging testing is the occurrence of inrush current and transient overvoltage, this has the potential to reduce transformer reliability. This study was conducted to determine the value of inrush current, transient overvoltage and determine the impact on transformers from modeling simulation data and actual data of line charging tests. Based on the results of the analysis, the largest inrush current and transient overvoltage were obtained from modeling with the switching method at 52L with a value of 6.56 kA and 307.3 kV. The transient overvoltage value from the simulation results shows a result of 2.5 times the nominal voltage. If it done continuously will cause the failure transformer operation. The most effective method to reduce the inrush current is the switching method on 52G with sequential switch, with this method the inrush current decreased by 83.6% from the 52G method.*

*Keywords* : *Line charging, transformator, inrush current, transient overvoltage*

## 1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan zaman yang semakin maju, teknologi penunjang kehidupan yang menggunakan energi listrik juga terus mengalami peningkatan yang signifikan, sehingga peranan energi listrik menjadi semakin penting. Karena itu, kehandalan sistem dan

peralatan yang memberikan suplai listrik kepada konsumen menjadi fokus utama dalam upaya penyediaan energi listrik [1]. Untuk memastikan kehandalan tersebut dilakukan serangkaian pengujian-pengujian dalam sistem kelistrikan. Salah satu pengujian yang berkaitan dengan kehandalan adalah pengujian *line charging* [2]. Pengujian *line charging* adalah kondisi di mana pada jalur transmisi

tidak terdapat tegangan sementara pembangkit beroperasi terisolasi untuk memberikan suplai ke saluran transmisi dan peralatan transmisi lain berlanjut ke beban, dalam situasi yang dikondisikan. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan peralatan dapat beroperasi ketika dibutuhkan. *Line charging* secara umum dilakukan untuk memberikan suplai kepada power pembangkit tambahan lain agar dapat melakukan *start up*. Semakin banyak pembangkit yang dapat melakukan *line charging* akan semakin mempercepat proses pemulihan sistem kelistrikan setelah terjadi gangguan hilang tegangan/*black out* [3]. Dalam desain sebuah sistem kelistrikan terdapat pembangkit yang dirancang untuk dapat melakukan *line charging* dan ada pembangkit yang tidak didesain untuk melakukan *line charging*. PLTGU Cilegon merupakan unit pembangkit yang tidak dirancang untuk beroperasi dengan *line charging* sehingga diperlukan studi kelayakan untuk memastikan kehandalan peralatan. Salah satu peralatan penting yang memiliki kemungkinan kegagalan dalam pengujian tersebut adalah transformator.

Transformator adalah mesin listrik yang dapat mentransformasikan energi listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya melalui gandingan magnet berdasarkan prinsip induksi magnet [4]. Secara umum transformator digunakan untuk mengubah energi listrik dari satu level tegangan ke level tegangan yang lain [5]. Salah satu dampak dari operasi transformator dalam pengujian *line charging* tersebut adalah terjadinya *inrush current* dan transien tegangan lebih.

*Inrush current* adalah arus transien dengan amplitude tinggi yang terjadi pada saat transformator daya diberikan daya [6]. Sedangkan transien tegangan lebih dapat didefinisikan sebagai peristiwa transien disebabkan oleh osilasi di antara komponen konservatif yang terhubung, atau dalam kasus apa pun di sirkuit listrik, dan umumnya terjadi karena dua alasan. Yang pertama adalah adanya harmonisa tegangan atau arus di sirkuit pada frekuensi yang dekat dengan frekuensi resonansi. Alasan kedua terkait dengan peristiwa sementara yang menyebabkan sistem berosilasi pada frekuensi aslinya [7]. Kedua hal tersebut memiliki potensi mengurangi kehandalan transformator [8],[9]. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh *inrush current* pada transformator 292 MVA. Hasil perhitungan tersebut akan digunakan untuk mengetahui kelayakan operasi transformator pada pengujian *line charging*, sehingga dapat ditentukan langkah pencegahan untuk meminimalisir resiko tersebut.

## 2. Metode

### 2.1. Data Transformator

Transformator yang digunakan untuk penelitian ini adalah main transformator, unit transformator, excitation transformator GT 1.1 milik PT. Indonesia Power PLTGU Cilegon, dan IBT Cilegon Baru milik PT PLN (Persero),

dengan detail spesifikasi pada Tabel 1. Data spesifikasi transformator tersebut selanjutnya akan digunakan untuk perhitungan dan pemodelan *inrush current* pada matlab *power system*.

Tabel 1. Spesifikasi Transformator

No.	Item	Spesifikasi			
		Main Trafo	Unit Trafo	Exc. Trafo	IB Trafo
1	Pabrik	PT. CG	TMT & D	TMT & D	N/A
2	Sistem Pendingin	PSI	Corp.	AN	N/A
3	Kapasitas	ODAF	ONAN/ONAF	AN	N/A
4	Kapasitas	292 MVA	32,5 MVA	1,8 MVA	501 MVA
5	Frekuensi Rasio Tegangan (Primer/Sekunder)	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
6	Tegangan Impedansi	157,5 kV / 15 kV	15 kV / 6,3 kV	15	500
7	Connection Year	11,40 %	10,02 %	kV/0,43	kV/15
8	Manufacture	0,00096	N/A	0 kV	0 kV
9	Winding Resistance HV	Ynd1	Dyn11	N/A	N/A
10	Winding Resistance LV	2018	2004	2004	N/A

### 2.2. Data Pengujian Line Charging

Tabel 2. Data Pengujian Line Charging

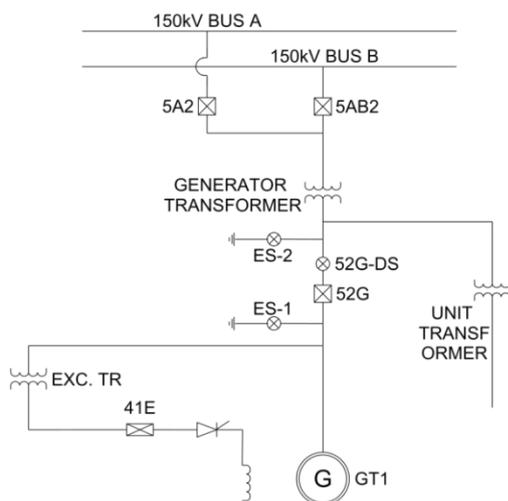
No.	Tagging Name	12CH C00C E012 GEN. VOLT. A-B PHASE	12CH C00C E013 GEN. VOLT. B-C PHASE	12CH C00C E014 GEN. VOLT. C-A PHASE	12CH C00C E015 GEN. CURR. A PHASE	12CH C00C E016 GEN. CURR. B PHASE	12CH C00C E017 GEN. CURR. C PHASE
		kV	kV	kV	kA	kA	kA
1	24:28:04	-0,08	-0,02	-0,1	0,02	-0,06	-0,04
2	24:28:05	-0,08	-0,02	-0,1	0,02	-0,06	-0,04
3	24:28:06	0,22	-0,02	-0,1	0,02	-0,06	-0,04
4	24:28:16	10,37	10,39	10,32	0	-0,08	-0,06
5	24:28:17	11,2	11,29	11,31	0	-0,08	-0,06
6	24:34:35	14,83	14,9	14,8	0,04	-0,05	-0,02
7	24:34:36	14,85	14,9	14,81	0,04	-0,05	-0,02
8	24:34:43	14,82	14,91	14,81	0,04	-0,05	-0,02
9	24:34:44	14,82	14,91	14,82	0,04	-0,05	-0,02
10	24:34:45	13,79	13,9	14,05	2,33	4,44	4,04
11	24:34:46	13,07	13,12	13,27	2,01	2,15	1,97
12	24:34:47	13,32	13,4	13,48	1,25	1,53	1,4
13	24:34:48	13,68	13,78	13,85	1	1,27	1,14
14	24:34:49	14,12	14,17	14,19	0,87	1,11	0,98
15	24:34:50	14,29	14,4	14,39	0,75	0,92	0,76
16	24:34:53	14,7	14,76	14,72	0,51	0,56	0,44
17	24:34:54	14,8	14,86	14,8	0,44	0,49	0,38
18	24:34:58	14,95	15,01	14,95	0,27	0,26	0,19
19	24:35:01	15,01	15,08	15	0,19	0,17	0,12
20	24:35:02	15	15,08	14,98	0,17	0,13	0,09
21	24:35:06	14,95	15,03	14,95	0,12	0,05	0,04
22	24:35:07	14,95	15,03	14,93	0,1	0,04	0,02
23	24:55:07	14,9	14,95	14,88	0,08	0,03	0,05
24	24:55:08	14,89	14,96	14,88	0,08	0,03	0,05
25	24:55:09	15,01	15,01	14,7	1,28	0,91	3,45
26	24:55:10	14,92	14,97	14,72	1,18	0,05	1,27
27	24:55:11	14,86	14,93	14,77	0,63	0	0,72

Dari pengujian *line charging* yang telah dilakukan pada bulan Oktober 2020 terdapat data-data yang bisa diamati antara lain tegangan dan arus generator. Data pengujian *line charging* tersebut akan digunakan untuk analisis parameter-parameter yang terdampak pada saat pemutus rangkaian 56G dan 52L *closed*, yang pada saat yang sama timbul *inrush current* pada main transformer GT 1.1 PLTGU Cilegon.

Dari Tabel 2, data yang diberi warna hijau merupakan data pada saat GMCB/52G *closed* sedangkan data yang diberi warna kuning merupakan data pada saat gas insulated circuit breaker pada *switchyard/52L* di posisi *closed*.

### 2.3. Single Line Diagram PLTGU Cilegon

PLTGU Cilegon merupakan unit pembangkit listrik tenaga gas dan uap yang memiliki konfigurasi 2.2.1 yakni 2 gas turbin (GT), 2 *heat recovery steam generator* (HRSG) dan 1 turbin uap (ST). Gabungan ketiganya menghasilkan daya pembangkitan sebesar 740 MW, yakni masing-masing GT menghasilkan daya listrik sebesar 240 MW dan sisanya adalah daya listrik yang dihasilkan oleh ST. Gambar 1 merupakan diagram *single line* output generator sampai dengan switchyard 150 kv, pada sistem tersebut terdapat generator, GMCB 52G, ac circuit breaker 5A dan 5AB/52L, transformator, unit transformator, transformator eksitasi dan pemutus rangkaian medan. Dalam pengujian *line charging* generator akan beroperasi terisolasi kemudian akan mengirimkan tegangan listrik output generator menuju *switchyard* melalui GMCB, kemudian akan diteruskan menuju sistem transmisi selanjutnya melalui pemutus rangkaian ac 5A dan 5AB. Pada pengujian *line charging* yang dilakukan pada unit Gas Turbin Generator 1.1 pada tanggal 11 Oktober 2020, saat GMCB dioperasikan *closed* maka terjadi *inrush current* pada main transformer, dimana transformator utama ditenagai melalui terminal tegangan rendah (LV), sesuai diagram pada Gambar 1.



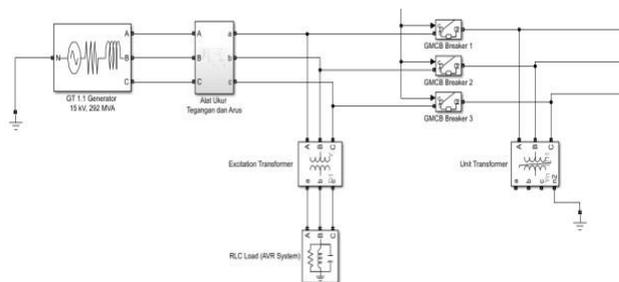
Gambar 1. Single Line Diagram PLTGU Cilegon

### 2.4. Pemodelan *Inrush Current* dan Transient Tegangan lebih

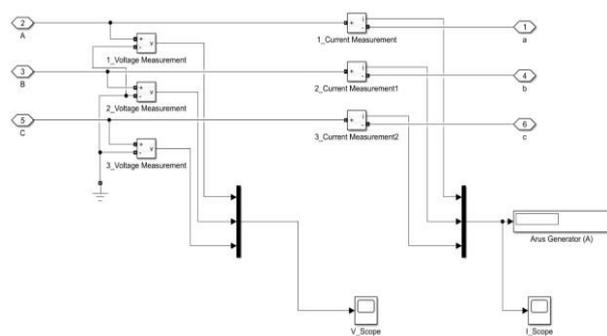
Berikut ini adalah model dasar yang dibuat untuk mendapatkan gambaran umum tentang *inrush current* dan transient daya lebih transformator 292 MVA. Data spesifikasi transformator pada tabel 1 merupakan data aktual dari transformator. Parameter kunci yang diperlukan dalam pemodelan simulasi ini adalah data histerisis. Karena tidak terdapat data tersebut dan pabrikan juga tidak dapat memberikan karena alasan kerahasiaan data, maka pendekatan yang dilakukan adalah dengan menggunakan standar yang lebih luas yang terdapat dalam Matlab, yakni dengan memilih ceklis parameter pada transformator tersaturasi [10]. Dengan demikian akan didapatkan transformator dengan karakteristik histeresis. Berikut ini adalah komponen utama dari model yang digunakan dalam pemodelan dan simulasi.

#### 2.4.1. Input Main Transformator

Pemodelan *input* transformator ini didasarkan pada *single line* diagram gambar 1, bahwa energi yang dihasilkan akan memberikan *supply* ke transformator eksitasi selain itu juga akan diteruskan ke sisi tegangan tinggi unit transformator dan tegangan rendah transformator utama melalui GMCB. Model ini terdiri dari generator 3 fase, alat ukur tegangan dan arus, trafo eksitasi, unit transformator dan GMCB yang dibuat dengan menggunakan 3 buah breaker 1 fase untuk kebutuhan simulasi.

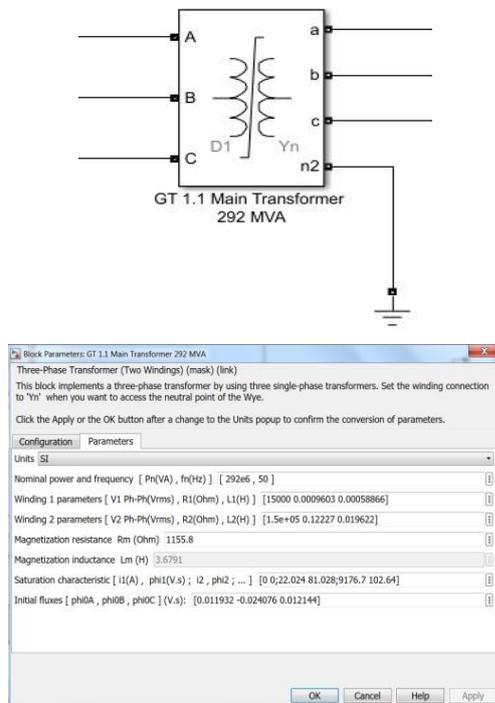


Gambar 2. Input Transformator Utama



Gambar 3. Subsystem Alat Ukur Tegangan dan Arus

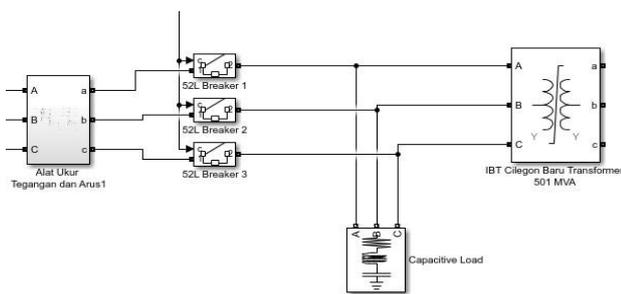
### 2.4.2. Transformator Utama



Gambar 4. Model Transformator Utama dan Parameter

Transformator utama yang digunakan adalah trafo *step up* dengan kapasitas 292MVA mentransformasikan tegangan dari 15 kV menjadi 150 kV. Konfigurasi vektor grup yang digunakan adalah Ynd1, yakni belitan bintang pada sisi high voltage dan delta dengan sudut 30° pada sisi *low voltage*. Detail parameter yang digunakan pada gambar 4.

### 2.4.3. Keluaran Transformator

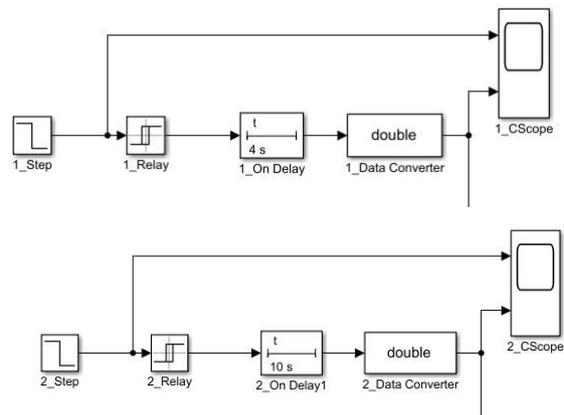


Gambar 5. Output Transformator

Pada model, keluaran transformator berfungsi untuk mensimulasikan keluaran dari tegangan tinggi trafo. Pada bagian ini terdiri dari gas *insulated circuit breaker/52L* 3 fasa, alat ukur untuk membaca transient tegangan lebih transformator dan beban yang diwakili oleh rangkaian RLC dengan daya aktif 1 kW, daya reaktif induktif 1kVAR, dan daya reaktif kapasitif 460MVAR. Nilai ini

mewakili kapasitansi jaringan (jalur transmisi). Besaran nilai ini didapatkan dengan pendekatan nilai dari data aktual pengujian *line charging* pada tabel 2. Beban lainnya adalah IBT Cilegon Baru yang akan menjadi beban induktif dengan daya sebesar 501 MVA.

### 2.4.4. Timer pemutus rangkaian



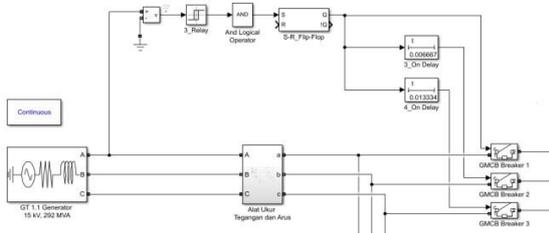
Gambar 6. Blok Timer pemutus rangkaian

Timer ini digunakan untuk trigger GMCB dan pemutus rangkaian pada switchyard (sisi tegangan tinggi transformator, pada GMCB timer akan menginisiasi sinyal on pada GMCB/52G dengan interval 4 detik setelah simulasi di *running*, sedangkan pada pemutus rangkaian *switchyard/52L timer* akan menginisiasi sinyal on pada pemutus rangkaian dengan interval 6 detik setelah simulasi dijalankan. Pada pemodelan ini diperlukan beberapa komponen untuk menginisiasi sinyal ke pemutus rangkaian diantaranya adalah *step*, yang digunakan untuk membangkitkan sinyal 1, kemudian *relay* digunakan untuk menerjemahkan sinyal dari *step*, komponen lain adalah *timer* dengan fungsi *on delay*, dan yang terakhir adalah blok konversi data yang digunakan untuk menerjemahkan sinyal keluaran *timer* menjadi sinyal yang sesuai untuk *input trigger* pemutus rangkaian. Model dapat dilihat pada gambar 6.

### 2.4.5. Circuit Breaker Timer Sequential Switch

Pada pemodelan ini digunakan serangkaian komponen untuk mensimulasikan sequential switch pada 3 fasa arus dengan jarak 120°, *residual flux* dalam sistem dapat dideteksi dengan mendeteksi *switching off angle* dengan monitoring tegangan dan arus sistem. *Breaker* fasa pertama akan diaktifkan dengan menghubungkan *voltmeter* pada fasa pertama kemudian diteruskan ke *relay* dan diteruskan ke *and logical* operator untuk menyesuaikan sinyal. Setelah itu dilanjutkan dengan komponen *SR flip flop* untuk mengunci status keluaran sinyal, mengingat pembacaan *voltmeter* yang akan berubah-ubah sesuai dengan sinusoida gelombang listrik. Keluaran dari *SR flip flop*

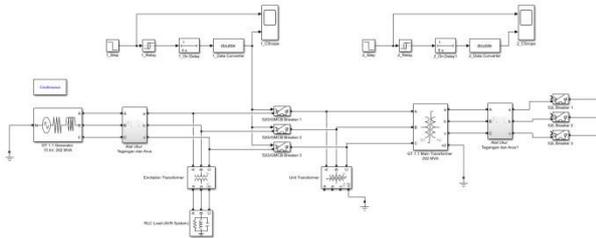
tersebut akan langsung diteruskan ke breaker fasa pertama, kemudian breaker fasa kedua dan ketiga akan diaktifkan masing-masing pada 0,006667 detik dan 0,013334 detik. Hal ini merepresentasikan perbedaan sudut fasa sebesar  $120^\circ$  pada setiap fasanya.



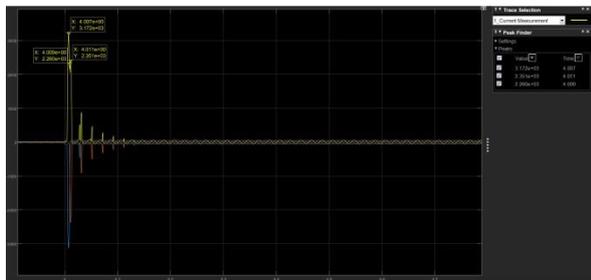
Gambar 7. Blok Circuit Breaker Sequential Switch

### 3. Hasil dan Analisis

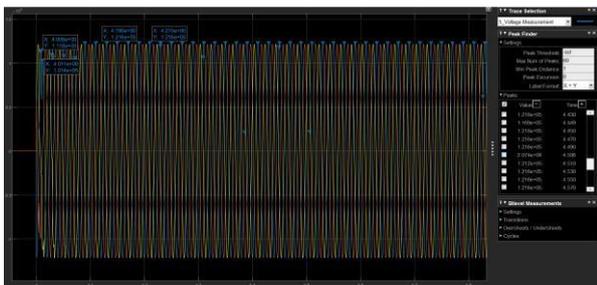
#### 3.1. Model 1 Switching Pada 52 G



Gambar 8. Model 1 Switching Pada 52 G



Gambar 9. Inrush Current Dengan Metode Switching pada 52 G

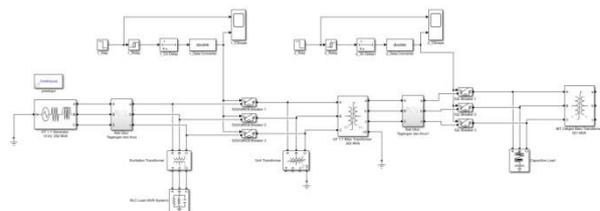


Gambar 10. Transient Voltage Dengan Metode Switching Pada 52 G

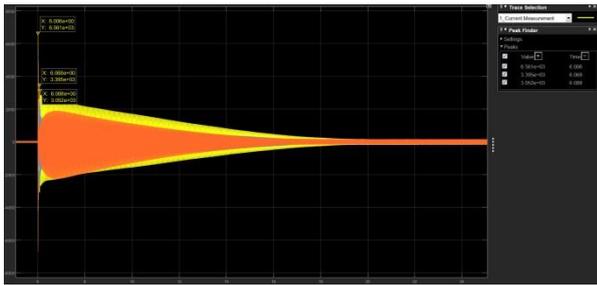
Dari data hasil simulasi di Gambar 9 dan 10, didapatkan bahwa ketika *switching* dilakukan pada GMCB (52G) didapatkan bahwa nilai *inrush current* terbesar adalah 3,171 kA. Dari data aktual pengujian *line charging* pada Tabel 2 nilai *inrush current* saat *switching* 52 G yang terbesar adalah 4,44 kA. Terdapat perbedaan 1,27 kA dengan hasil simulasi dengan Matlab Power System namun terdapat persamaan yakni arus terbesar yang terbaca adalah pada fase S. Hal ini dapat dikategorikan sebagai *sympathetic inrush current*, yang dihasilkan ketika beberapa transformator terkoneksi satu dengan yang lainnya dalam satu jalur, dan ketika salah satu dari transformator tersebut ditenagai maka akan menghasilkan *inrush current* jenis ini. Pada gambar 9 dapat dilihat bahwa dalam sebelum GMCB di closed, generator dan jaringan sudah terbebani dengan *excitation* transformator, namun dengan kapasitas yang kecil, jika *excitation* transformator tersebut diabaikan maka *inrush current* ini dapat dikategorikan sebagai *energisation inrush current*, yakni *inrush current* yang dihasilkan dari *re-energisation* transformator setelah transformator *shutdown*. Dengan *switching* pada 52 G memberikan efek *inrush current* yang cukup besar pada transformator, yakni sebesar 51 kali dari nilai arus normalnya.

Selain *inrush current* hal lain yang menjadi efek dari transformator yang ditenagai adalah transient tegangan lebih. Dari hasil simulasi dengan *switching* pada 52G tersebut didapatkan hasil bahwa pembacaan tegangan terendah pada sisi HV transformator adalah sebesar 101,4 kV, sedangkan tegangan normal yang terbaca adalah sebesar 121,6 kV, dari grafik transient tegangan pada gambar 10 menunjukkan bahwa *switching* dengan metode ini tidak menghasilkan transient tegangan lebih, pada data aktual pengujian *line charging* tegangan yang diukur adalah tegangan pada sisi terminal generator sedangkan pada data simulasi tegangan yang diukur adalah pada sisi HV transformator namun demikian terdapat kesamaan pola dimana pada saat *energizing* transformator utama yang terjadi adalah tegangan turun (*drop*), bukan naik.

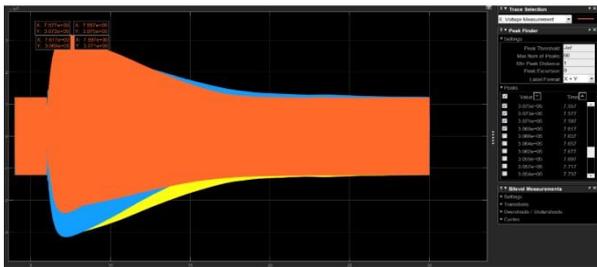
#### 3.2. Model 2 Switching Pada 52 L



Gambar 11. Model 2 Switching Pada 52 L



Gambar 12. *Inrush Current* Dengan Metode *Switching* Pada 52 L

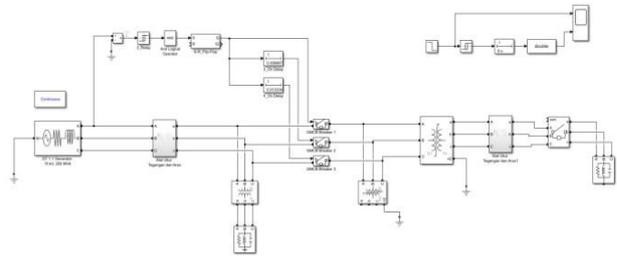


Gambar 13. *Transient Voltage* Dengan Metode *Switching* Pada 52 L

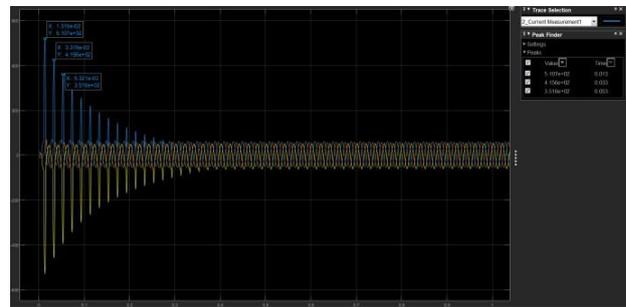
Dari data hasil simulasi di Gambar 12 dan 13 didapatkan bahwa ketika *switching* dilakukan pada pemutus rangkaian AC pada *switchyard* (52L) didapatkan bahwa nilai *inrush current* terbesar 6,56 kA pada fase R, dari data aktual pengujian *line charging* pada tabel 2 nilai *inrush current* saat *switching* 52 L yang terbesar adalah 3,45 kA pada fase T. Jika dibandingkan dengan metode *switching* pada 52G dari data simulasi nilai *inrush current* metode ini lebih tinggi 3,39 kA dan jika dibandingkan dengan data aktual *line charging* nilai *inrush current* dengan metode ini lebih tinggi kurang lebih sebesar 2,18 kA dan keuntungan lain dari metode ini *inrush current* pada transformator hanya akan terjadi 1 kali selama pengujian, sedangkan jika *switching* dilakukan pada 52G maka akan terjadi 2 kali *inrush current* yakni pada saat *switching* pada 52G dan *switching* pada 52L.

Pada simulasi dengan metode ini menunjukkan adanya *transient* tegangan lebih sebesar 307,3 kV dan terus turun sampai ke tegangan nominal selama kurang lebih 25 detik, sedangkan tegangan normal yang terbaca adalah sebesar 136,1 kV, hal ini dapat diamati dari grafik *transient voltage* pada gambar 13, pada data aktual pengujian *line charging* tegangan yang diukur tegangan pada sisi terminal generator sedangkan pada data simulasi tegangan yang diukur adalah pada sisi HV transformator namun demikian terdapat kesamaan pola dimana pada saat pemutus rangkaian 52L di *closed* terjadi kenaikan tegangan, hal ini dapat diamati pada tabel 2.

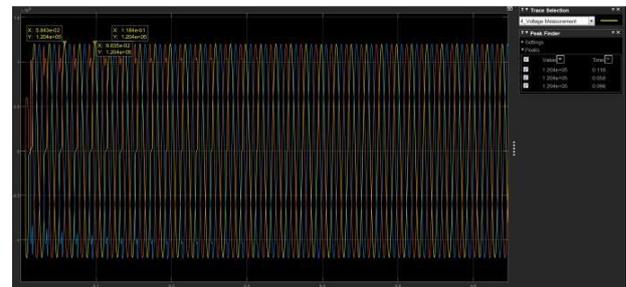
### 3.3. Model 3 *Switching* Pada 52 G dengan *Sequential Switch*



Gambar 14. Model 3 *Switching* Pada 52G dengan *Sequential Switch*



Gambar 15. *Inrush Current* Metode *Switching* Pada 52 G Dengan *Sequential Switch*

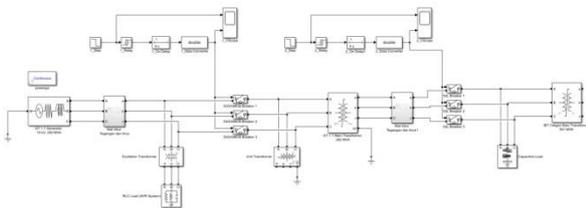


Gambar 16. *Transient Voltage* Metode *Switching* Pada 52 G Dengan *Sequential Switch*

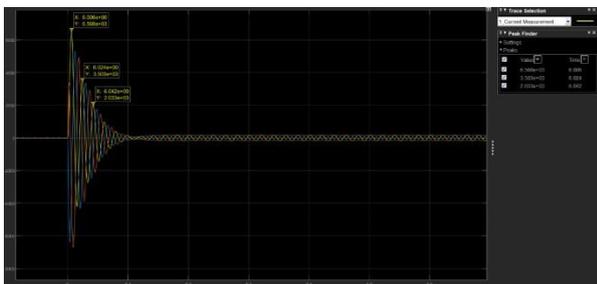
Dari data hasil simulasi di atas didapatkan bahwa ketika *switching* dilakukan pada G MCB (52G) dengan *sequential switch* didapatkan bahwa nilai *inrush* terbesar adalah 0,52 kA, dari arus normal sebesar 0,075 kA, metode ini jika dibandingkan dengan metode *switching* pada 52G secara langsung didapatkan penurunan arus *inrush* sebesar 2.651 kA atau sekitar 83.6%, hal ini sesuai dengan beberapa penelitian yang pernah dilakukan [11]. Pada metode ini juga tidak terjadi *transient* tegangan lebih seperti pada grafik gambar 16.

### 3.4. Model 4 Switching Pada 52 G dan 52L Dalam Waktu Bersamaan

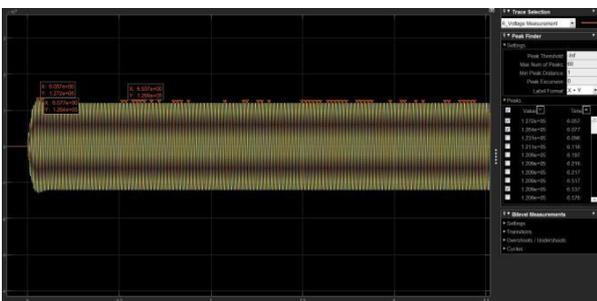
Dari data hasil simulasi diatas didapatkan bahwa ketika *switching* dilakukan pada GCMCB (52G) bersamaan dengan pemutus rangkaian AC pada *switchyard* (52L) didapatkan bahwa nilai *inrush current* terbesar adalah 6.56 kA dan kembali ke arus normal selama 1 detik, jika dibandingkan dengan metode *switching* pada 52 L mempunyai nilai *inrush current* yang hampir sama, namun metode ini mempunyai waktu terjadinya *inrush current* yang lebih singkat, dimana dengan metode *switching* pada 52L untuk kembali ke arus normal, dibutuhkan waktu 13 detik. Dengan metode ini tidak terjadi lonjakan tegangan seperti dapat diamati pada gambar 19.



Gambar 17. Model 4 Switching Pada 52G dan 52L Dalam Waktu Bersamaan



Gambar 18. Inrush Current Metode Switching Pada 52G dan 52L Dalam Waktu Bersamaan



Gambar 19. Transient Voltage Metode Switching Pada 52G dan 52L Dalam Waktu Bersamaan

### 3.5. Analisis Hasil

Table 2. Data Perbandingan Inrush Current Dan Transient Voltage

No	Model	Pemodel		Aktual Line Charging Inrush Current (kA)	Pengujian Transient Voltage (kV)
		Inrush Current (kA)	Transient Voltage (kV)		
1	Model 1 switching pada 52 G	3,171	101,4	4,44	N/A
2	Model 2 switching pada 52 L	6,56	307,3	3,45	N/A
3	Model 3 switching pada 52 G dengan sequential switch	0,52	60	N/A	N/A
4	Model 4 Switching 52G dan 52L dalam waktu bersamaan	6,56	127,2	N/A	N/A

#### 3.5.1. Analisis Pengaruh Nilai Inrush Current

Pada pemodelan dan data aktual pengujian *line charging* tabel 5 *inrush current* terbesar adalah 6,56 kA sedangkan arus maksimal yang dapat ditahan main transformator pada tegangan nominal dan faktor daya 1 adalah sebesar 11,239 kA dengan perhitungan sebagai berikut :

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}$$

$$I = P / (V \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3})$$

$$I = 292000000 / (15000 \cdot 1 \cdot \sqrt{3})$$

$$I = 11239 \text{ kA}$$

Hal ini mengindikasikan bahwa transformator masih dapat beroperasi aman dalam kondisi inrush tersebut. Hal lain yang perlu diperhatikan dalam operasi transformator untuk *line charging* adalah *relay* proteksi generator *negative sequence/unbalance* karena perbedaan arus antar fasa yang cukup tinggi dapat memicu aktif *relay* tersebut. *Setting* perbedaan arus pada *relay* tersebut adalah sebesar 8%, atau 0,26 A fase sekunder CT, dengan *ratio* CT 3000:1, maka perbedaan arus yang diijinkan adalah 0,78 kA, dengan jeda waktu secara invers sebesar 300 s. Di sisi lain, perbedaan arus antar fase pada simulasi yang paling besar adalah 3,17 kA selama 0,2 s. Pada data aktual pengujian *line charging* perbedaan arus antar fase yang paling besar adalah 2,54 kA selama 0,1 s.

Hal tersebut mengindikasikan bahwa transformator masih dapat dioperasikan normal dengan berbagai pemodelan tersebut. Namun demikian untuk menanggulangi dan menurunkan nilai *inrush current* dapat dilakukan dengan menerapkan metode 3 yakni *switching* pada 52 G dengan *sequential switch*. Hal ini lebih mudah diimplementasikan dibandingkan dengan *closed 52 G* sebelum unit start karena ada kemungkinan terjadi anomali pada sistem yang lain dan dibutuhkan banyak modifikasi.

### 3.5.2. Analisis Pengaruh Nilai *Transient Tegangan* lebih

Tegangan nominal transformator di HV *side* adalah 150 kV. Tegangan sangat erat kaitannya dengan kemampuan isolasi belitan. Pengoperasian peralatan dalam kondisi tegangan berlebih dapat memicu kerusakan pada belitan yang jika dilakukan secara terus menerus akan memperpendek umur kerja transformator [12]. Pada simulasi metode yang menghasilkan nilai *transient* tegangan lebih paling besar adalah metode simulasi 2 yakni pemodelan dengan *switching* pada 52L pada metode ini *transient* tegangan lebih yang terjadi adalah sebesar 307,3 kV atau 2,5 kali dari tegangan normalnya seperti dapat dilihat pada tabel 2. Tegangan ini jika dikombinasikan dengan *inrush current* maka didapatkan daya sebagai berikut [13] :

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}$$

Arus pada low voltage transformator :

$$I = 11239 \text{ kA}$$

Arus pada high voltage tranformer :

$$I = P / (V \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3})$$

$$I = 292,000,000 / (157,500 \cdot 1 \cdot \sqrt{3})$$

$$I = 1070,4 \text{ kA}$$

Perbandingan arus low voltage dibanding dengan high voltage :

$$\frac{I_{lv}}{I_{hv}} = \frac{11239}{1070,4}$$

$$\frac{I_{lv}}{I_{hv}} = \frac{10,5}{1}$$

Inrush Current terbesar pada LV transformator adalah 6560 A; sehingga

$$I_{hv} = 6560 / 10,5$$

$$I_{hv} = 624,74 \text{ A}$$

Daya Transformator

$$P = 307500 \cdot 624,74 \cdot 0,85 \sqrt{3}$$

$$P = 282,8 \text{ MW}$$

Dari perhitungan di atas didapatkan bahwa daya tersebut melebihi kemampuan transformator (*overload*) dimana pada *power faktor* 0,85 kemampuan maksimal transformator adalah 282,8 MW. Sehingga metode *switching* pada 52L akan membahayakan transformator. Tegangan dan arus yang besar tersebut akan memicu

kegagalan pada transformator berupa kerusakan belitan transformator. Selain hal tersebut efek lain yang mungkin terjadi adalah adanya frekuensi resonansi yang nilainya di atas frekuensi normal sehingga akan memicu sistem proteksi bekerja dan akan mematikan peralatan (*trip*), sebagaimana ditemukan pada penelitian lain [14],[15]. Metode *switching* pada 52L ini tidak dapat dihindari sehingga diperlukan tindakan mitigasi untuk menanggulangi hal tersebut, diantaranya adalah dengan memposisikan 52G dan 52 L dalam keadaan *closed* sebelum generator start. Hal ini akan menghilangkan *inrush current* dan *transient* tegangan lebih secara keseluruhan namun diperlukan koordinasi pembebanan yang sangat ketat, sebagaimana diamati pula pada [12],[16]. *Transient* tegangan lebih ini disebabkan karena pembebanan yang cukup besar berupa beban kapasitif jaringan dan beban induktif trafo IBT.

## 4. Kesimpulan

Setiap metode pemodelan mempunyai nilai *inrush current* dan *transient* tegangan lebih yang bervariasi, metode *switching* mempengaruhi besaran *inrush current* dan *transient voltage*. Parameter yang mempengaruhi besaran *inrush current* dan *transient voltage* diantaranya adalah kapasitas transformator, sudut fase, trafo saturasi atau bukan trafo saturasi dan jenis pembebanan transformator. *Inrush current* dan *transient* tegangan lebih terbesar didapat dari pemodelan dengan metode *switching* pada 52L dengan nilai 6,56 kA sedangkan *transient* tegangan lebih terbesar adalah 307,3 kV. Dari data hasil simulasi dan aktual pengujian *line charging*, besaran *inrush current* masih dalam batas operasi transformator, sehingga aman untuk dioperasikan. Nilai *transient* tegangan lebih dari hasil simulasi menunjukkan hasil 2,5 kali dari tegangan nominalnya hal ini akan membahayakan belitan transformator, yang jika dilakukan terus menerus akan menyebabkan kegagalan operasi transformator. Metode yang paling efektif untuk menurunkan *inrush current* pada saat *switching* dengan 52G adalah metode *switching* pada 52G dengan *sequential switch*, dengan metode ini didapatkan penurunan *inrush current* sebesar 83,6 % dari metode 52G, namun dengan metode masih terjadi *transient* tegangan lebih pada saat *switching* pada 52L. Metode paling dapat menjadi solusi permasalahan *inrush current* dan *transient* tegangan lebih pada pengujian *line charging* di PLTGU Cilegon adalah metode *switching* pada 52 G dan 52 L secara bersamaan, dengan metode ini *inrush current* memiliki waktu yang singkat untuk kembali pada nilai *steady state*, dan tidak terjadi *transient* tegangan lebih. Pada penerapan solusi metode *switching* pada 52G dan 52L secara bersamaan diperlukan penyesuaian SOP yang sangat ketat pada sisi pembebanan. Perlu dilakukan pemodelan dan simulasi metode *switching* 52G dan 52L sebelum generator *start up*. Perlu dilakukan pengkajian lebih lanjut mengenai metode lain untuk menurunkan *transient* tegangan lebih. Perlu dilakukan penngkajian mengenai pembebanan generator dan trafo pada saat

pengujian *line charging*. Diperlukan penambahan alat ukur untuk mengetahui nilai tegangan pada HV transformator. Diperlukan studi mendalam mengenai dampak kaitan *inrush current* dan *transient* tegangan lebih terhadap umur transformator.

## Referensi

- [1]. Berlianti, R., Fauzi, R. dan Monice, M., Analisis Penerapan Tindakan Pemeliharaan Sistem Distribusi 20 kV Dalam Pengoptimalan ENS dan FGTM. SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri, 2021, Vol. 5(2), hal. 44-50.
- [2]. Priyono, T.O. Analisis Optimalisasi PLTMG Senayan Sebagai Pengirim Tegangan Sistem Pasca Blackout Agustus 2019. Jurnal Elektro, 2021, vol. 9(1), hal. 45-54.
- [3]. Nasution, M.F., Mustafa, F. and Shaulgara, S. Case studies of magnetizing inrush current effect on differential & REF transformer protection. In 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS) (hal. 1-6). 2019.
- [4]. Siburian, J. Karakteristik Transformator. JURNAL TEKNOLOGI ENERGI UDA. 2019; Volume VIII, Nomor 1, Maret 2019 : 21-28 23.
- [5]. Badaruddin, B. dan Firdianto, F.A. Analisis Minyak Transformator Pada Transformator Tiga Fasa Di Pt X. Jurnal Teknologi Elektro, 2016 Vol. 7(2), hal. 141465.
- [6]. Arief M. Perhitungan Dan Analisis Inrush Current Pada Transformator Berbasis Parameter Transformator. Jurnal STT YUPPEN TEK. 2018; Vol. 9 No 1.
- [7]. Sudhakar, T.D. dan Srinivas, K.N. Restoration of power network—a bibliographic survey. European Transactions on Electrical Power, 2011, vol. 21(1), hal. 635-655.
- [8]. Biswas, S., Dash, R.N., Choudhury, K.V.V.S.R. dan Sahoo, S.P., A review paper on inrush fault isolation methods of a three-phase transformer. 2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), hal. 1-5. 2018.
- [9]. Al-Khalifah., AK., Saadany, EF. Investigation of magnetizing inrush current in a single –phase transformer. Power engineering conference. 2006, 26-28 July 2006; IEEE, Halifax, NS, hal. 165-171.
- [10]. Moses PS, Mosoum MA, Toliyat HA. Dynamic modelling of three-phase asymmetric power transformers with magnetic hysteresis: No-load and inrush conditions. IEEE Transactions on energy conversion. 2010; vol. 25, no. 4, hal. 1040-1047.
- [11]. Barros, J., de Apráiz, M. and Diego, R.I., May. Analysis and Visualization of Time-Varying Harmonics in Transformer Inrush Currents. In 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) (pp. 1-6). 2021,
- [12]. Rhozi F, Firdaus. Pengurangan Arus Inrush Pada Tranformator Daya Dengan Menggunakan Konverter Reaktor DC. Jom FTeknik. 2019; Vol. 6. No. 1.
- [13]. Li X, Wen X, Markham P, Liu Y. Analysis of nonlinear characteristics for a three-phase - five-limb transformer under DC Bias. IEEE transactions on power delivery. 2010; vol. 25, no. 4, hal. 2504-2510.
- [14]. Singh, K., Yadav, A., Singh, G. and Varshney, L. Analysis between Various Mitigation Techniques of Inrush Current in Transformer. In 2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE) (pp. 165-167). 2021.
- [15]. Priambodo, N.W., Harsono, B.B.S., Mangunkusumo, K.G.H. and Munir, B.S., 2019, July. A Case Study of Transformer Inrush Current Analysis in Java-Bali Power System. In 2019 5th International Conference on Science and Technology (ICST), hal. 1-5.
- [16]. Mitra, J., Xu, X. and Benidris, M. Reduction of three-phase transformer inrush currents using controlled switching. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, vol. 56(1), hal. 890-897.