

STUDI KOMPARASI SPEKTRUM HARMONIK GANGGUAN INTERNAL DAN INRUSH CURRENT PADA TRAF0 DAYA MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK PSCAD (*POWER SYSTEM COMPUTER AIDED DESIGN*)

Ayuni Mustika¹, Nursanti Ade Putri², Abdul Hafid³, Andi Faharuddin⁴

^{1,2,3,4} Prodi Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

e-mail: ayunimustika94@gmail.com¹, nursantiadeputri21@gmail.com², abdul.hafid@unismuh.ac.id³, afaharuddin@gmail.com⁴

Abstract— Transformer is one of the equipment in the electric power system that has a very important role, therefore the reliability of the transformer must be considered. Certain phenomena can appear in the transformer that can cause interference and will affect the performance and safety system of the transformer so that it will also affect the performance of the transformer, in this case, the IC phenomenon when energizing the transformer. The magnitude of the resulting IC value has the potential to cause the differential protection system to recognize the IC as an internal fault current so that it will order the relay to operate. Therefore, differentiation between the IC and the internal fault current, it is very important that the differential relay does not undergo such a malfunction. This study was conducted to distinguish the state of internal and IC disorders based on their harmonic phenomena. This research consists of two modeling, namely IC conditions and modeling the conditions of internal disturbances in the transformer. In this study, the transformer data used was a GE Pauwels brand transformer with a power of 60 MVA with a voltage of 150/20 kV and a zero-weighted Y-Y connection. The simulation in this study was made using PSCAD Student Software Version 4.2. Cases of internal disorders do not indicate the presence of significant harmonic individuals. The THD value is essentially zero at both the time of the interference resistance value of 1 Ohm and 5 Ohms. The low THD value is related to the spectrum value which is also essentially zero. It shows that the disorder is in the form of a pure sinusoidal signal. While in the case of IC, overall it is very distorted which is illustrated from the THD value which is from about 13% to above 100%. That fact is supported by a spectrum value that is overall very high, until it reaches a maximum value of 77%. Both parameters indicate that the IC signal is strongly distorted (not pure sinusoidal), in contrast to the interference signal.

Keywords: Harmonic spectrum, Internal interference, Inrush Current, Power transformer, PSCAD software.

Intisari— Trafo merupakan salah satu peralatan dalam sistem tenaga listrik yang memiliki peran sangat penting, oleh karena itu keandalan transformator harus diperhatikan. Fenomena-fenomena tertentu dapat muncul dalam transformator yang dapat menyebabkan gangguan dan akan memengaruhi kinerja

dan sistem keamanan pada transformator sehingga akan memengaruhi pula performa transformator tersebut, dalam hal ini, fenomena IC saat energisasi trafo. Besarnya nilai IC yang dihasilkan berpotensi menyebabkan sistem proteksi diferensial mengenali IC sebagai arus gangguan internal sehingga akan memerintahkan relai untuk beroperasi. Oleh karena itu, diferensiasi antara IC dan arus gangguan internal, sangat penting agar relai diferensial tidak mengalami malfungsi seperti itu. Penelitian ini dilakukan untuk membedakan keadaan gangguan internal dan IC berdasarkan fenomena harmoniknya. Penelitian ini terdiri dari dua pemodelan yaitu kondisi IC serta pemodelan kondisi gangguan internal pada trafo. Dalam penelitian ini, data trafo yang digunakan adalah Trafo merek GE Pauwels dengan daya 60 MVA bertegangan 150/20 kV dan koneksi Y-Y berbeban nol. Simulasi pada penelitian ini dibuat menggunakan Perangkat Lunak PSCAD Student Version 4.2. Kasus gangguan internal tidak menunjukkan adanya individu harmonik yang signifikan. Nilai THD secara esensial bernilai nol baik pada saat nilai resistansi gangguan 1 Ohm maupun 5 Ohm. Nilai THD yang rendah itu terkait dengan nilai spektrum yang juga secara esensial bernilai nol. Hal itu menunjukkan bahwa sinyal gangguan adalah berbentuk sinyal sinusoidal murni. Sementara pada kasus IC, secara keseluruhan sangat terdistorsi yang tergambar dari nilai THD yang berada dari sekitar 13 % hingga di atas 100 %. Fakta itu didukung oleh nilai spektrum yang secara keseluruhan sangat tinggi, hingga mencapai nilai maksimum 77 %. Kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa sinyal IC sangat terdistorsi (bukan sinusoidal murni), berbeda dengan sinyal gangguan.

Kata kunci: Spektrum harmonik, Gangguan internal, Inrush Current, Trafo daya, Perangkat lunak PSCAD.

I. PENDAHULUAN

Trafo merupakan salah satu peralatan dalam sistem tenaga listrik yang memiliki peran sangat penting, yaitu untuk menaikkan tegangan dari pembangkit yang disalurkan pada sistem transmisi dan untuk menurunkan tegangan dari sistem transmisi untuk kemudian didistribusikan ke beban-beban seperti industri, perkantoran, maupun rumah tangga. [1]

Keandalan transformator harus diperhatikan karena semakin andal sebuah transformator maka akan semakin baik

kualitas daya yang dihasilkan sehingga tidak ada kerugian dari pihak konsumen maupun pihak produsen listrik. Oleh karena itu, sistem proteksi yang baik pada transformator sangat diperlukan.

Fenomena-fenomena tertentu dapat muncul dalam transformator yang dapat menyebabkan gangguan dan akan mempengaruhi kinerja dan sistem keamanan pada transformator sehingga akan mempengaruhi pula performa transformator tersebut, salah satu fenomena tersebut adalah inrush current. Saturasi inti magnet dari transformator adalah penyebab utama terjadinya inrush current. Pada saat transformator daya dihubungkan dengan sumber tegangan dalam keadaan tanpa beban, akibat dari proses penyaklaran akan timbul lonjakan arus yang dikenal dengan inrush current.

Arus pada inrush current hanya mengalir di kumparan primer transformator. Sistem proteksi diferensial yang bekerja berdasarkan keseimbangan arus yang menuju dan meninggalkan transformator dan diharapkan hanya merespon gangguan internal. Besarnya nilai inrush current yang dihasilkan menyebabkan sistem proteksi diferensial mengenali inrush current sebagai arus gangguan internal dan memerintahkan relai beroperasi. Bagaimana membedakan antara inrush current dengan arus gangguan internal masih merupakan masalah yang penting dalam sistem proteksi transformator.

Diferensiasi antara inrush current dan arus gangguan internal bertujuan agar relai dapat mengambil keputusan yang tepat untuk proses tripping. Hal ini perlu dilakukan karena inrush current bukan sebuah gangguan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik tanpa mengubah frekuensinya.[2]

Transformator adalah suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandingan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya. [3]

B. Gangguan pada Transformator

Gangguan didefinisikan sebagai kegagalan pada suatu rangkaian yang mengganggu aliran arus normal.

Gangguan dalam operasi sistem tenaga listrik adalah kejadian yang menyebabkan bekerjanya relai diluar kehendak operator, sehingga menyebabkan putusnya aliran daya. Gangguan pada trafo berupa gangguan internal dan gangguan eksternal, Salah satu jenis gangguan internal adalah gangguan hubung singkat. Umumnya gangguan ini dapat dideteksi dengan mudah karena akan selalu timbul arus atau tegangan yang tidak normal dan tidak seimbang. Berdasarkan bentuknya, gangguan terbagi dua yaitu gangguan simetris dan gangguan asimetris. [4]

C. Inrush current

Inrush current adalah arus peralihan dengan amplitudo tinggi yang terjadi pada saat transformator daya diberikan power (*dienergized*). Besar amplitudonya bisa 5.6 kali arus normalnya, waktu transient ini kurang dari 60 ms. Transformator akan mengalami lonjakan arus (*inrush*) magnetisasi saat *energized*. *Inrush current* ini terjadi pada transformator kapan saja jika fluks (residu) tidak sama dengan nilai sesaat dari fluks *steady-state* yang biasanya diperlukan untuk titik tertentu pada bentuk gelombang tegangan dimana sirkuit ditutup.[1]

Studi tentang fenomena lonjakan magnetisasi transformator telah berlangsung bertahun-tahun. *Inrush Current* terjadi di transformator setiap kali polaritas dan besarnya fluks sisa tidak sesuai dengan polaritas dan besarnya nilai ideal sesaat dari fluks keadaan tunak. Transformator energi adalah penyebab khas arus masuk, tetapi setiap transient dalam rangkaian transformator dapat menghasilkan arus ini. Penyebab lainnya termasuk pemulihan tegangan setelah pembersihan kesalahan eksternal atau energisasi sebuah trafo paralel dengan trafo yang sudah di melayani. Besaran dan bentuk gelombang arus masuk tergantung pada banyak faktor dan hampir tidak mungkin untuk memprediksi.[5]

D. Harmonik

Harmonik adalah suatu komponen sinusoidal dari suatu periode gelombang yang mempunyai suatu frekuensi yang merupakan kelipatan bulat dari gelombang fundamental f , frekuensi harmonik orde ke "n" adalah $n \times f$. Biasanya istilah harmonik ini digunakan untuk mendefinisikan distorsi gelombang sinus arus dan tegangan pada amplitudo dan frekuensi yang berbeda. Distorsi harmonik disebabkan karena adanya beban *non-linear* dalam sistem tenaga. Peralatan elektronik seperti komputer, *printer*, peralatan listrik dengan *switching* elektronik, Lampu Hemat Energi (LHE) dan *Florescent Lamp* (FL) dengan ballast elektronik merupakan beban *non-linear*. [6]

Untuk menganalisis pengaruh harmonik terhadap kualitas tegangan dan arus ditentukan oleh indeks harmonik, yaitu THD (*Total Harmonic Distortion*) dan TDD (*Total Demand Distortion*). Perbandingan nilai komponen harmonik

dengan komponen fundamental biasanya dinyatakan dalam persen, indeks ini disebut dengan THD (*Total Harmonic Distortion*). THD biasanya digunakan untuk menyatakan bentuk penyimpangan bentuk gelombang arus dan tegangan yang mengandung harmonik terhadap gelombang sinusoida murni dalam satu perioda.[7]

E. Spektrum Harmonik pada Trafo

Transformator Ada tiga harmonik yang biasanya paling signifikan atau dominan dalam *IC* pada saat energisasi atau eksitasi trafo daya yakni harmonik ke-2, -3 dan -4. Nilai relatif (dalam bentuk persentase terhadap fundamental) harmonik ke-2 dapat mencapai 68 %, harmonik ke-3: 26,8 % serta harmonik ke-4: mencapai 5,1 %. Fenomena harmonik yang sangat berlawanan atau berbeda, terjadi pada saat gangguan hubung-singkat, yakni bahwa tidak terjadi distorsi harmonik yang signifikan, sebagai mana yang terjadi pada kasus *insrush current* (Mason, 1979), Senada dengan Mason dan Edward, Hodder dkk. (2014), juga menyebutkan bahwa kandungan harmonik yang paling dominan dalam *IC* pada operasi energisasi trafo adalah harmonik kedua.

Demikian pula, menurut sudut insepisi penyaklaran memengaruhi magnitudo harmonik dari gelombang arus *IC*. Grafik pada Gambar 2.12 memperlihatkan bahwa magnitudo harmonik kedua (gambar atas) dari Fase-B pada sudut insepisi tertentu, lebih besar dari yang lain, yang mana, pola serupa juga terjadi pada harmonik keempat.[8]

F. PSCAD (*Power System Computer Aided Design*)

PSCAD (Power System Computer Aided Design) adalah antarmuka pengguna grafis yang kuat dan fleksibel untuk solusi *EMTDC* yang terkenal di dunia mesin. *PSCAD* memungkinkan pengguna untuk secara skematis membangun sebuah sirkuit, menjalankan simulasi, menganalisis hasil, dan mengelola data dalam lingkungan grafis yang terintegrasi penuh. Merencanakan online fungsi, kontrol, dan pengukur juga disertakan, sehingga pengguna dapat mengubah parameter sistem selama menjalankan simulasi, dan melihat hasilnya secara langsung.[9]

PSCAD dilengkapi dengan perpustakaan model yang telah diprogram dan diuji, mulai dari elemen pasif sederhana dan fungsi kontrol, hingga model yang lebih kompleks, seperti mesin listrik, *FACTS* perangkat, saluran transmisi dan kabel. Jika model tertentu tidak ada, *PSCAD* memberikan fleksibilitas untuk membangun model kustom, baik dengan merakitnya secara grafis menggunakan model yang ada, atau dengan memanfaatkan Editor Desain yang dirancang secara intuitif.[9]

III. METODE PENELITIAN

Durasi waktu penelitian direncanakan selama enam bulan terhitung per bulan Maret dan berakhir Agustus 2022. Sementara itu, lokasi penelitian dilaksanakan di Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar. Dalam penelitian ini, data trafo yang digunakan adalah Trafo I, merek GE Pauwels dengan daya 60 MVA bertegangan 150/20 kV. Data selengkapnya tentang trafo yang dimaksud, disajikan dalam Tabel 1. [10]

TABEL I
DATA TRAFODAYA

Data Trafo Tenaga	
Merk	GE PAUWELS
Daya	60 MVA
Arus HS sisi 150	29,101 kA
Tegangan	150/20 kV
Impedansi (Z%)	12,04 %
Inominal	1732,05 A
Vektor Grup	YNyn0

A. Jalan Penelitian

a. Simulasi Inrush Current

Simulasi *IC* dilakukan dengan memvariasikan sudut insepisi gangguan, mulai dari sudut 0° sampai dengan 120°. Nilai waktu-naik (*ramp-up time*) tegangan sumber, sebesar 0,06 detik. Nilai ini berdasarkan panduan *PSCAD*, menyarankan nilai minimal sebesar tiga kali periode sinyal.

b. Simulasi Gangguan Internal

Simulasi gangguan internal dilakukan dengan meletakkan gangguan tiga fase di sisi sekunder trafo. Oleh karena konfigurasi SEE yang beroperasi secara radial, maka arus CT di sisi sekunder trafo, akan bernilai nol.

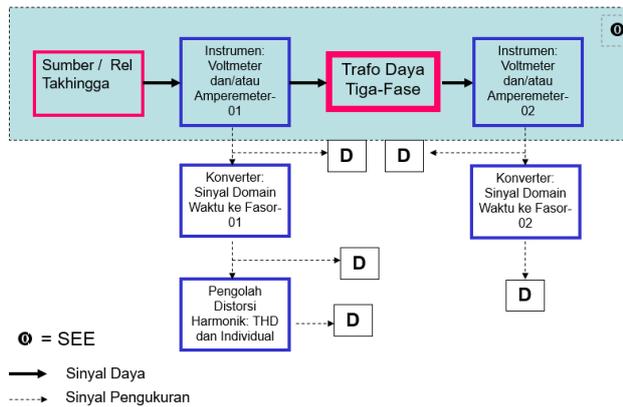
B. Kerangka Penelitian

Kerangka dasar penelitian ini terdiri atas pemodelan kondisi inrush current serta pemodelan kondisi gangguan internal pada trafo, di dalam lingkungan Perangkat Lunak *PSCAD*. Selanjutnya, proses pengamatan fenomena spektrum harmonik pada kedua kondisi tersebut di atas

C. Diagram Konfigurasi Sistem

1. Diagram Konfigurasi Sistem Inrush Current

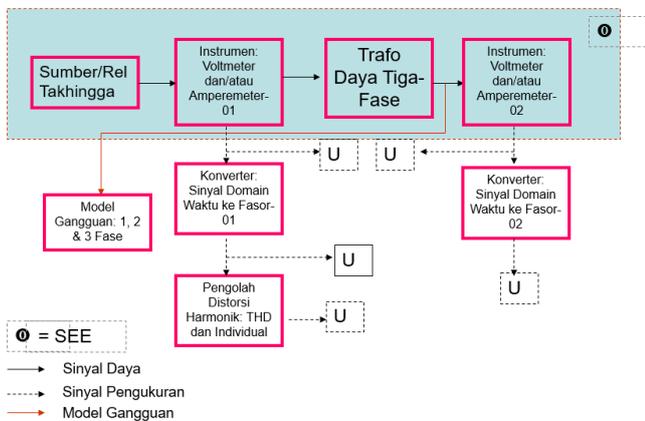
Perangkat-Lunak PSCAD



Gbr 1 Diagram konfigurasi sistem inrush current

2. Diagram Konfigurasi Sistem Gangguan Internal

Perangkat-Lunak PSCAD



Gbr 2 Diagram konfigurasi sistem gangguan internal

D. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yaitu:

1. Studi Literatur

Tahap ini, berkaitan dengan telaah pustaka agar mempertajam dasar teori yang menyangkut dengan judul, melalui sarana berupa buku-buku literatur, modul, artikel, jurnal dan eksplorasi internet.

2. Penentuan Judul dan Permasalahan/Tujuan

Tahap ini adalah penentuan judul/topik dan rumusan masalah serta tujuan, yang berdasar pada studi pustaka yang telah dilakukan.

3. Desain Kerangka Penelitian dan Konfigurasi Sistem

Tahapan ini, berupa desain kerangka dasar dan konfigurasi sistem/model.

4. Pengambilan Data

Tahapan ini, berupa pengumpulan dan/atau penentuan data trafo yang akan diolah atau dimodelkan.

5. Pemodelan

Tahapan ini, penulis melakukan pemodelan atau implementasi desain konfigurasi sistem (langkah 04) ke model dalam PL PSCAD. Model yang dihasilkan berupa model gangguan internal dan inrush current.

6. Simulasi

Tahap ini, berupa penyimulasian model yang akan menghasilkan data spektrum untuk gangguan internal dan inrush current. Adapun poin dalam penyimulasian ini ialah:

- a. Memvariasikan sudut insepasi, mulai dari sudut 0° sampai dengan 120° dengan gradasi kenaikan sudut sebesar 10° pada inrush current. Adapun tahapannya ialah:

1. Setel sudut insepasi di generator sebesar 0°

2. Menjalankan simulasi

3. Membaca nilai THD, spektrum, dan nilai arus

4. Ulangi langkah 1, 2 dan 3 dengan memastikan sudut insepasinya selalu bertambah 10° sampai pada sudut insepasi 120°

- b. Memvariasikan sudut insepasi, mulai dari sudut 0° sampai dengan 120° dengan gradasi kenaikan sudut sebesar 10° .

Resistansi gangguan 1 dan 5 Ohm pada gangguan internal. Adapun tahapannya ialah:

1. Setel sudut insepasi di generator sebesar 0° .

2. Setel resistansi gangguan sebesar 1 Ohm.

3. Menjalankan simulasi.

4. Membaca nilai tegangan sumber, THD, IHD/spektrum, dan nilai arus-arus.

5. Ulangi langkah 1, 2, 3 dan 4 dengan memastikan sudut insepasinya selalu bertambah 10° sampai pada sudut insepasi 120° .

6. Untuk resistansi gangguan sebesar 5 Ohm sepenuhnya sama dengan langkah 1 Ohm hanya saja nilai resistansi gangguan di langkah ke 2 itu diganti menjadi 5 Ohm.

7. Analisa

Tahapan ini, penulis menganalisa hasil simulasi yang telah dilakukan berupa data spektrum harmonik gangguan internal serta inrush current. Hasil yang diharapkan adalah adanya pola berbeda yang signifikan antara spektrum pada kedua kasus.

7. Tahap akhir

Tahapan ini adalah penulisan laporan.

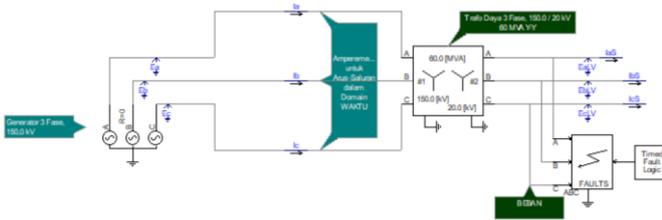
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan spektrum dan level distorsi harmonik atau bentuk gelombang dari gangguan internal dan IC pada trafo dengan metode simulasi. Simulasi yang dilakukan, pada prinsipnya menggunakan dua model PSCAD, yakni:

- a. Simulasi 1, merupakan kasus gangguan internal pada trafo. Simulasi dilakukan pada dua macam resistansi gangguan: 1 dan 5 Ohm.
- b. Simulasi 2, merupakan kasus IC pada trafo.

1. Kasus Gangguan Internal

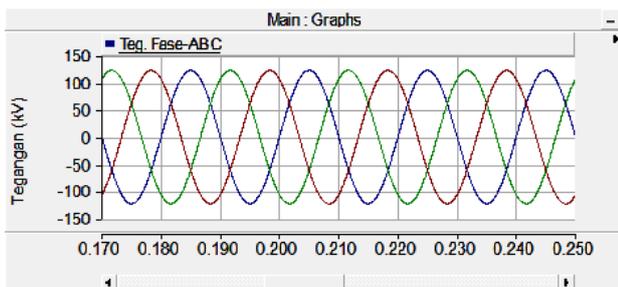
Model PSCAD untuk menyimulasikan pola spektrum dan level distorsi sinyal arus, pada saat terjadi gangguan internal, terdiri atas tiga bagian utama, yakni Model SEE, Sistem Instrumentasi dan Model Gangguan Tiga-Fase (Gambar 3).



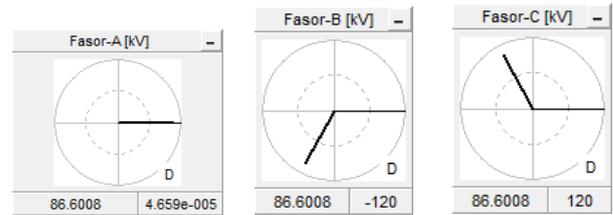
Gbr 3 Model PSCAD (tanpa display) untuk kasus gangguan internal

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai efektif arus gangguan dengan resistansi gangguan 1 Ohm adalah lebih dari 2 kA pada Fase-A, untuk seluruh varian sudut insepasi. Oleh karena, Gangguan Tiga-Fase adalah simetris, maka nilai arus pada kedua fase yang lain (Fase-B & -C), juga lebih dari 2 kA, Ketiganya hanya berbeda dalam sudut, dalam hal ini, di antara ketiganya, terdapat selisih fase sebesar 120 derajat. Hal itu berarti, sudut insepasi tidak memengaruhi nilai efektif arus gangguan. Hasil yang serupa, berlaku untuk parameter nilai DC Offset, pada seluruh sudut insepasi gangguan yang tersimulasikan.

Sementara itu, parameter-parameter derajat distorsi harmonik seperti THD dan IHD menunjukkan bahwa menunjukkan nilai yang sangat kecil (secara praktis dianggap nol), untuk seluruh fase dan pada seluruh sudut insepasi yang tersimulasikan. Hasil itu menunjukkan bahwa sinyal arus gangguan internal adalah bersifat sinusoidal murni. Hal itu konsisten dengan apa yang disebutkan oleh Mason (1979) dan Alstom (2011)[14] bahwa sinyal gangguan hubung-singkat bersifat miskin harmonik.



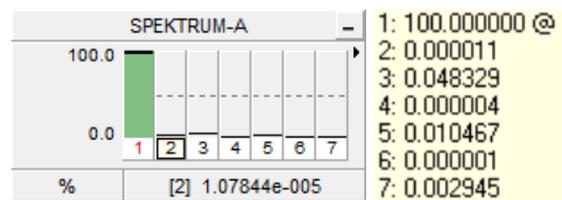
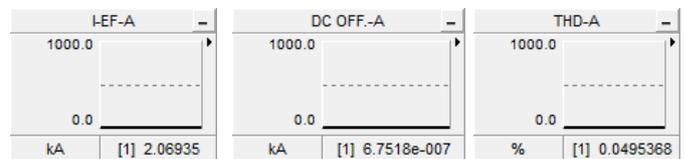
(i) domain waktu



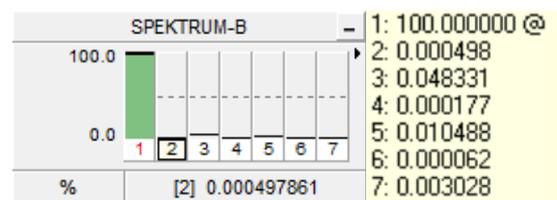
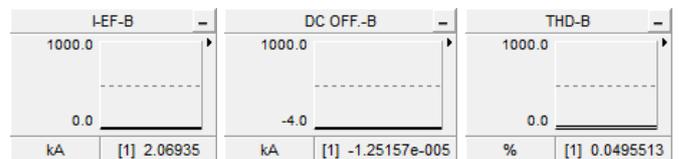
(ii) domain fasor

Gbr 4. Grafik tegangan sumber (Fase-A, -B & -C) pada sudut insepasi 0°, -120° dan 120°, masing-masing untuk Fase-A, -B dan -C, pada kasus gangguan internal ($R_f = 1\Omega$)

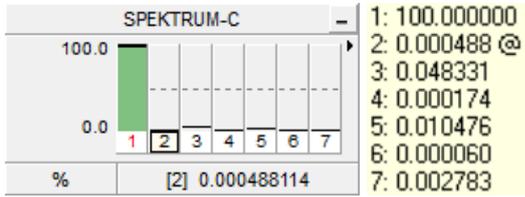
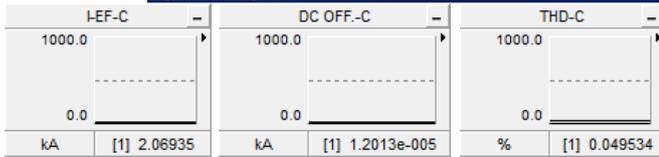
Grafik pada Gambar 4, menggambarkan sinyal sumber tegangan dengan sudut insepasi masing-masing, dalam kasus nilai resistans gangguan sebesar 1 Ohm. Sinyal domain-waktu dari sumber tiga-fase bertegangan fase, sekitar 87 kV, terlihat di Gambar 4.2.(i) yang secara grafik diagram fasor diperlihatkan pada Gambar 4.2.(ii). Sudut insepasi tegangan, masing-masing yaitu: Fase-A, 0o; -B, -120o dan -C, 120o.



(i) Fase-A



(ii) Fase-B



(ii) Fase-C

Gbr 5 Arus dan distorsi harmonik untuk kasus gangguan internal ($R_f = 1\Omega$) pada sudut inepsi sumber: Fase-A= 0° , -B= -120° dan -C= 120°

Sementara itu, grafik pada Gambar 5, menggambarkan sinyal arus di sisi primer, beserta derajat atau level distorsi harmoniknya, pada nilai resistansi gangguan sebesar 1 Ohm, serta sudut inepsi tegangan, masing-masing yaitu: Fase-A, 0° ; -B, -120° dan -C, 120° . Parameter sinyal arus gangguan yang ditampilkan berupa magnitudo efektif, DC Offset, THD dan IHD. Sebagaimana disampaikan di atas bahwa nilai efektif dari arus Fase-A bernilai sedikit di atas 2 kA. Nilai arus efektif yang sama juga terlihat untuk Fase-B dan -C., yang mana fenomena ini sesuai dengan teori gangguan simetris. Terlihat pula dari grafik bahwa dalam kasus ini, nilai DC Offset untuk Fase-A adalah kecil sekali (sekitar $6,8 \times 10^{-7}$ kA) yang secara praktis dianggap nol. Fenomena, DC Offset yang demikian juga terjadi baik di Fase-B maupun -C. Akan halnya, parameter THD Fase-A, juga terlihat bahwa nilainya sangat kecil yakni di bawah 0,5 persen. Nilai THD tersebut konsisten dengan nilai IHD yang mana, pada prinsipnya hanya mengandung frekuensi fundamentalnya. Parameter-parameter distorsi harmonik tersebut, baik secara sendiri maupun keduanya menunjukkan bahwa level distorsi gelombang arus hubung singkat tiga-fase sangat rendah. Atau dengan kata lain, bahwa sinyal gelombang arus hubung-singkat tiga-fase bersifat sinusoidal murni. Karakter distorsi harmonik gangguan hubung-singkat yang diperoleh tersebut, sesuai betul dengan teori yang disampaikan oleh Mason (1979). Fenomena distorsi harmonik Fase-B dan -C, juga serupa dengan yang terjadi pada Fase-A, yakni derajat distorsi harmonik yang sangat rendah.

Sementara itu, untuk mendapatkan nilai aktual dari spektrum digunakan persamaan dibawah ini (Faharuddin, 2022)[12].

$$I_{ef.} = \sqrt{I_F^2 + I_H^2}$$

Keterangan:

$I_{ef.}$ = Arus Efektif (A)

I_F = Arus Fundamental (A)

I_H = Arus Harmonik (A)

Nilai efektif spektrum dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan dibawah tersebut, sehingga akan diperoleh hasil sebagai berikut.

$$I_{ef.} = \sqrt{[I_F x]^2 + [I_{h_2} x]^2 + [I_{h_3} x]^2 + [I_{h_4} x]^2 + [I_{h_5} x]^2 + [I_{h_6} x]^2 + [I_{h_7} x]^2}$$

$$2069 = \sqrt{[1x]^2 + [0x]^2 + [0x]^2 + [0x]^2 + [0x]^2 + [0x]^2 + [0x]^2}$$

$$2069 = \sqrt{1x^2 + 0x^2 + 0x^2 + 0x^2 + 0x^2 + 0x^2 + 0x^2}$$

$$2069 = \sqrt{1x^2}$$

$$2069 = x$$

$$x = 2069 \text{ A}$$

Nilai x yang telah diperoleh di atas, selanjutnya disubstitusi ke persamaan IHD masing-masing, sehingga diperoleh nilai arus efektif IHD sebagai berikut:

$$I_1 = x = 2069 \text{ A}$$

$$I_2 = 0 \times 2069 = 0 \text{ A}$$

$$I_3 = 0 \times 2069 = 0 \text{ A}$$

$$I_4 = 0 \times 2069 = 0 \text{ A}$$

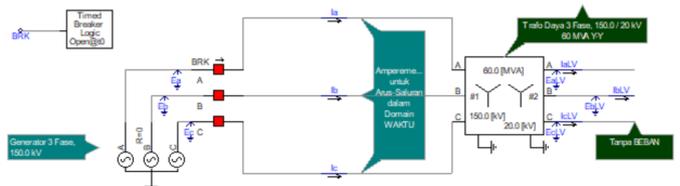
$$I_5 = 0 \times 2069 = 0 \text{ A}$$

$$I_6 = 0 \times 2069 = 0 \text{ A}$$

$$I_7 = 0 \times 2069 = 0 \text{ A}$$

Hasil analisis IHD di atas, yang menunjukkan bahwa pada hubung singkat tiga-fase, tidak terdapat harmonik, sesuai dengan hasil simulasi serta teori dari Mason (1979).

2. Kasus *Inrush Current*



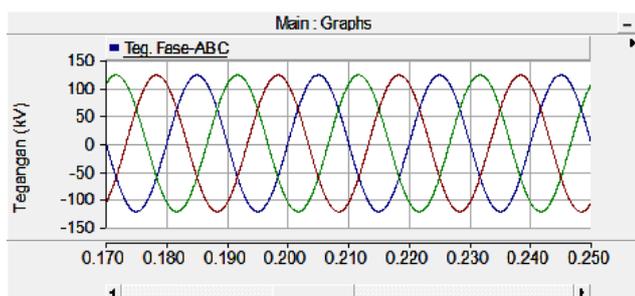
Gbr. 6 Model PSCAD (tanpa display) untuk kasus inrush current

Model PSCAD untuk mensimulasikan pola spektrum dan level distorsi sinyal arus, pada saat terjadi IC akibat

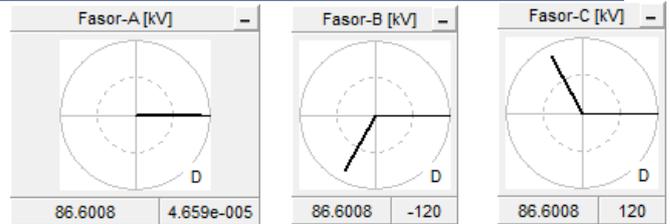
energisasi trafo tanpa beban, pada dasarnya serupa dengan Model Gangguan Intaernal. Jadi, model ini juga terdiri tas tiga bagian, Model SEE dan Sistem Instrumentasi terdapat bagian Model Rangkaian Penyaklaran, sebagai pengganti Model Gangguan Tiga-Fase (Gambar 6). Model Rangkaian Penyaklaran terdiri atas Pemutus-Daya Tiga-Fase beserta Rangkaian Kontroler inepsinya. Jadi, model ini berfungsi untuk merepresentasikan operasi penyaklaran tiga-fase pada trafo berbeban nol. Waktu penutupan (close) disetel 0,2 detik (atau 10 siklus), setelah SEE dinyalakan (running). Dengan demikian, penyetelan sudut-fase pada nilai tertentu untuk Fase-A di generator, akan sekaligus menyetel sudut-insepsi ke sudut yang sama. Sebagai contoh, penyetelan sudut-fase generator sebesar "0" derajat, akan menghasilkan operasi penyaklaran dengan sudut-insepsi "0" derajat, juga.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai efektif arus IC, bervariasi dari satu fase ke fase yang lain serta dari satu sudut insepsi ke sudut imsepsi yang lain. Nilai arus IC berkisar dari minimum sekitar 0,01 kA hingga maksimum sekitar 0,3 kA. Sementara itu, nilai arus DC Offset berkisar dari minimum nol hingga maksimum, sekitar 0,24 kA. Serupa dengan arus efektif, nilai arus DC Offset, tersebut juga bervariasi dari satu fase ke fase yang lain serta dari satu sudut insepsi ke sudut imsepsi yang lain. Variasi nilai efektif dan DC Offset, dari satu fase ke fase lain, pada hakekatnya, juga adalah variasi sudut insepsi.

Parameter derajat distorsi harmonik menunjukkan bahwa secara keseluruhan atau secara mayoritas, derajat atau level distorsi sinyal arus IC sangat tinggi. Nilai THD bergerak dari minimum 13 % hingga ke nilai maksimum, sedikit di atas 100%. Hal ini terkait dengan tingginya derajat IHD atau spektrum harmonik, baik dalam kuantitas maupun kualitas, dari harmonik ke-2 hingga ke-7, dengan orde harmonik yang paling dominan adalah orde ke-2, kecuali pada kasus sudut insepsi 140o. Fenomena dominasi harmonik ke-2 ini, sesuai dengan yang disampaikan oleh Mason (1979), Alstom (2011)[14], Behrendt dkk. (2011)[5] dan Hodder dkk. (2014)[8], bahwa IC terkarakterisasi dalam bentuk dominasi harmonik ke-2.



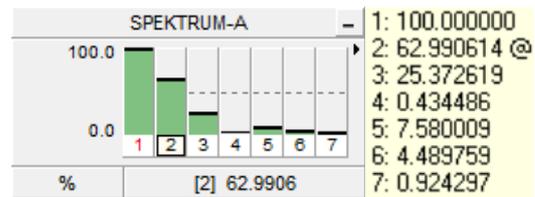
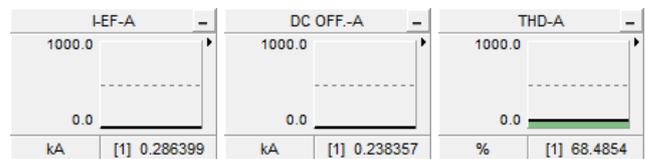
(i) domain waktu



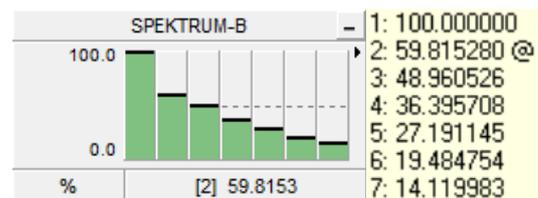
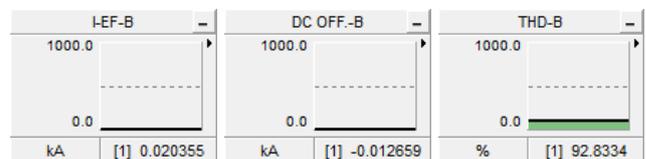
(ii) domain fasor

Gbr. 7 Grafik tegangan sumber (Fase-A, -B & -C) pada sudut insepsi 0°, -120° dan 120°, masing-masing untuk Fase-A, -B dan -C, pada kasus *inrush current*.

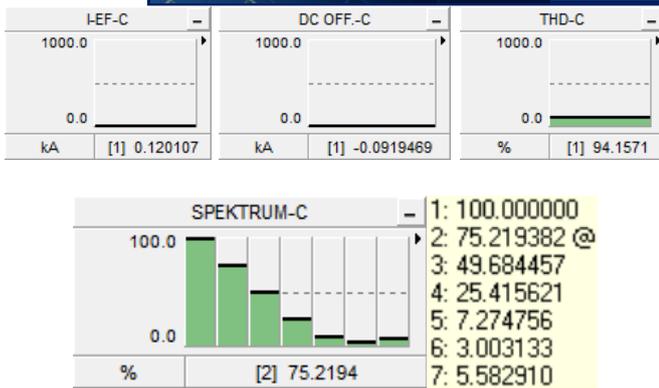
Grafik pada Gambar 7, menggambarkan sinyal sumber tegangan dengan sudut insepsi masing-masing, dalam kasus IC. Sinyal domain-waktu dari sumber tiga-fase bertegangan fase, sekitar 87 kV, terlihat di Gambar 7.(i) yang secara grafik diagram fasor diperlihatkan pada Gambar 7.(ii). Sudut insepsi tegangan, masing-masing yaitu: Fase-A, 0°; -B, -120° dan -C, 120°.



(i) Fase-A



(ii) Fase-B



(iii) Fase-C

Gbr 8. Arus dan distorsi harmonik untuk kasus *inrush current* pada sudut inepesi sumber: Fase-A = 0°, -B = -120° dan -C = 120°

Sementara itu, grafik pada Gambar 8, menggambarkan sinyal arus di sisi primer, beserta derajat atau level distorsi harmoniknya, pada saat terjadi IC, serta sudut inepesi tegangan, masing-masing yaitu: Fase-A, 0°, -B, -120° dan -C, 120°. Parameter sinyal arus gangguan yang ditampilkan berupa magnitudo efektif, DC Offset, THD dan IHD. Sebagaimana disampaikan di atas bahwa nilai efektif dari arus Fase-A bernilai lebih dari 0,2 kA. Nilai arus efektif yang berbeda terlihat pada Fase-B dan -C., yakni masing-masing, sekitar 0,02 dan 0,12 kA. Terlihat pula dari grafik bahwa dalam kasus ini, nilai DC Offset untuk Fase-A adalah besar yakni lebih dari 0,2 kA. Fenomena, DC Offset yang sangat berbeda terjadi baik di Fase-B maupun -C, karena nilainya sangat kecil yakni masing-masing -0,012 dan -0,091 kA. Akan halnya, parameter THD Fase-A, terlihat bahwa nilainya sangat besar yakni di atas 68 persen. Nilai THD tersebut konsisten dengan sejumlah nilai IHD yang signifikan yaitu harmonik kedua dan ketiga. Harmonik kedua bernilai hampir 63 % serta ketiga lebih dari 25%, yang lain di bawah 10%. Parameter-parameter distorsi harmonik tersebut, baik secara sendiri maupun keduanya menunjukkan bahwa level distorsi gelombang arus IC sangat tinggi. Atau dengan kata lain, bahwa sinyal gelombang IC bersifat sangat distorsif. Karakter distorsi harmonik IC yang diperoleh tersebut, sesuai betul dengan teori yang disampaikan oleh Mason (1979), Edward (2019)[13] serta Hodder dkk. (2014)[8]. Fenomena distorsi harmonik Fase-B dan -C, juga serupa dengan yang terjadi pada Fase-A, yakni derajat distorsi harmonik yang juga sangat besar.

Sebaiknya tidak lebih dari 3 tingkat untuk *heading*. Semua *heading* harus dalam font 10pt. Setiap kata dalam suatu *heading* harus berhuruf kapital, kecuali untuk kata-kata pendek seperti yang tercantum dalam Bagian III-B.

Nilai efektif spektrum dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan dibawah ini, sehingga akan diperoleh hasil sebagai berikut.

$$I_{ef} = \sqrt{[I_F x]^2 + [I_{h_2} x]^2 + [I_{h_3} x]^2 + [I_{h_4} x]^2 + [I_{h_5} x]^2 + [I_{h_6} x]^2 + [I_{h_7} x]^2}$$

$$300 = \sqrt{[1x]^2 + [0.63x]^2 + [0.254x]^2 + [0x]^2 + [0.076x]^2 + [0.045x]^2 + [1x]^2}$$

$$300 = \sqrt{1x^2 + 0.4x^2 + 0.1x^2 + 0x^2 + 0.006^2 + 0.002x^2 + 1x^2}$$

$$300 = \sqrt{1.6x^2}$$

$$300 = 1.3x$$

$$1.3x = 300$$

$$x = \frac{300}{1.3}$$

$$x = 231 \text{ A}$$

Nilai x yang telah diperoleh di atas, selanjutnya disubstitusi ke persamaan IHD masing-masing, sehingga diperoleh nilai arus efektif IHD sebagai berikut:

$$I_1 = x = 231 \text{ A}$$

$$I_2 = 0.63 \times 231 = 145.53 \text{ A}$$

$$I_3 = 0.254 \times 231 = 57.75 \text{ A}$$

$$I_4 = 0 \times 231 = 0 \text{ A}$$

$$I_5 = 0.075 \times 231 = 17.325 \text{ A}$$

$$I_6 = 0.045 \times 231 = 10.4$$

$$I_7 = 0.01 \times 231 = 2.31 \text{ A}$$

Hasil analisis IHD di atas, yang menunjukkan bahwa pada saat IC sebagai akibat energisasi trafo tanpa beban, harmonik dominan yaitu harmonik kedua dengan nilai sekitar 145 A. Inrush current juga mengandung , sesuai dengan hasil simulasi serta teori dari Mason (1979), Edward (2019) [13] serta Hodder dkk. (2014) [8].

V. KESIMPULAN

Dari penjelasan terkait hasil simulasi dan analisa menggunakan software PSCAD V 4.2.0 yang dilakukan pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan bahwa:

a. Distorsi harmonik total dan spektrum, sangat rendah, pada gangguan internal dengan nilai resistansi gangguan 1 Ohm. Nilai THD dan IHD, secara praktis adalah keduanya

bernilai nol (di bawah 0.5 %) untuk keseluruhan sudut insepasi yang tersimulasikan. Hal ini, secara esensial menunjukkan bahwa sinyal arus gangguan adalah sinusoidal murni. Fenomena yang identik juga terjadi pada gangguan dengan resistansi gangguan 5 Ohm. Kedua kasus hanya berbeda dalam besar arus gangguan efektif yakni lebih 2 kA untuk resistansi gangguan 1 Ohm serta di atas 0,8 kA untuk resistansi gangguan 5 Ohm, hal yang menunjukkan bahwa arus gangguan berbanding terbalik dengan impedansi gangguan.

b. Distorsi harmonik total dan spektrum, untuk kasus IC, secara keseluruhan bernilai sangat tinggi. Nilai THD bergerak, sesuai sudut insepasinya, dari minimum 13 % hingga maksimum, lebih dari 100%. Hal ini terkait dengan derajat IHD, dari harmonik ke-2 hingga ke-7, yang mana, orde paling dominan adalah orde ke-2 yang bernilai 77 %, kecuali pada kasus sudut insepasi 140o (13 %). Hal ini menunjukkan bahwa sinyal arus IC adalah sangat terdistorsi.

[14] Alstom (2011). Network Protection and Automation Guide: Protective Relays, Measurement and Control, Alstom Grid.

REFERENSI

- [1] Ksatria, A. B., & Ramadhan, A. W. (2020). Analisis Karakteristik Arus Inrush pada Transformator 3 Fasa dengan Leg yang Berbeda Berbasis Eksperimen. 2.
- [2] Siburian, J. (2019). Karakteristik transformator. *Jurnal Teknologi Energi UDA*, VIII(21), 21, 23.
- [3] Gultom, P., Danial, I., & Rajagukguk, M. (2018). Studi susut umur transformator distribusi 20 KV Akibat pembebanan lebih. *Teknik Elektro*.
- [4] Gaffar, A., Agussalim., & Arisandi, D. (2017). Analisis gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi 20 kv di gardu induk panakkukang, 2, 156–162.
- [5] Behrendt, K., Fischer, N., Labuschagne, C., Behrendt, K., Fischer, N., & Labuschagne, C. (2011). Considerations for Using Harmonic Blocking and Harmonic Restraint Techniques on Transformer Differential Relays Considerations for Using Harmonic Blocking and Harmonic Restraint Techniques on Transformer Differential Relays. 2(3).
- [6] Wildi, Theodore. (2002). *Electrical Machines, Drives, and Power System*. United States of America: R.R. Donnelley & Sons Company.
- [7] Jamaah, A. (2013). Pengaruh Distorsi Harmonik Terhadap Penurunan Kapasitas Daya Trafo Distribusi 3 Fasa 400 kVA di Politeknik Negeri Semarang. *Jet*, 2(1), 1–10.
- [8] Hodder, S., Kasztenny, B., Fischer, N., and Xia, Y., (2014). Low Second-Harmonic Content in Transformer Inrush Currents – Analysis and Practical Solutions for Protection Security, IEEE.
- [9] Muller, Craig. (2005). *PSCAD User's Guide V 4.2*. Canada: Manitoba HVDC.
- [10] Fauzan, M. I., Juningtyastuti, & Facta, M. (2016). Analisis Resetting Rele Arus Lebih Akibat Perubahan Tranformator Daya Dan Penambahan Penyulang Di Gardu Induk Srandol Semarang. *Transient*, 5(2302–9927), 9.
- [11] Blackburn, J. Lewis. (1987). *Protective Relaying (Principles and Applications)*. New York: Marcel Dekker, INC.
- [12] Faharuddin, A. (2022). Formula Aproksimasi & Program MS-Excel untuk Relasi Nilai Efektif Sinyal dengan Nilai Efektif Spektrum Harmonik pada Software PSCAD/EMTDC
- [13] Edward (2019). *Essential Fundamentals of Harmonics Distortion for Future Power Quality Wxperts*, EEP.