

Analisis Karakteristik Arus dan Tegangan pada Inisiasi Ferroresonansi Transformator Tegangan Rendah

I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda¹, I Made Yulistya Negara¹, Adi Soeprijanto¹, Dimas Anton Asfani^{1,2}, Mochammad Wahyudi³, Daniar Fahmi¹

Abstract—Ferroresonance is an interaction phenomenon between non-linear inductance and capacitance that initiates abnormal waveform of current and voltage. This phenomenon is very sensitive to system parameter and initial condition. In this paper, ferroresonance initiation involved a basic circuit of series ferroresonance with variation of source voltage magnitude on a single phase low voltage transformer. The scheme of experiment was based on the case of transformer energizing. The trends of current and voltage waveform on the primary windings were investigated and transformed by using Fast Fourier Transform (FFT). The harmonics spectrum was then employed to identify the ferroresonance mode and calculate the Total Harmonics Distortion (THD) of current and voltage. The experimental results showed that the higher source voltage magnitude caused the ferroresonance responses to be seen more clearly. It was indicated by the more distorted waveform, the higher odd harmonics frequency amplitude especially for 150 Hz, and the greater THD. Based on the harmonics spectrum and wave period, the ferroresonance responses were identified as fundamental mode. The effects of initial conditions, such as residual flux of transformer and capacitor charge, were also seen on the distorted wave peak during transient condition. In addition, the difference of waveform between normal and ferroresonance condition could be more easily observed on the voltage than the current. The waveforms of current and voltage during experiment had been verified by using simulation.

Intisari—Ferroresonansi merupakan sebuah interaksi antara induktans non-linier dan kapasitans yang menimbulkan bentuk gelombang arus dan tegangan abnormal. Respons ferroresonansi tersebut sangat sensitif terhadap parameter dan kondisi inisial sistem. Pada makalah ini, inisiasi ferroresonansi dilakukan pada rangkaian dasar ferroresonansi seri dengan memvariasikan tegangan sumber pada transformator tegangan rendah satu fase. Skema pengujian ferroresonansi mengacu pada kondisi pengisian daya transformator. Kecenderungan bentuk arus dan tegangan primer transformator diamati dan ditransformasi dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Kemudian, spektrum harmonik digunakan untuk identifikasi mode ferroresonansi dan penghitungan *Total Harmonic Distortion* (THD). Hasil pengujian ferroresonansi menunjukkan bahwa pemberian tegangan sumber yang lebih besar menyebabkan respons ferroresonansi terlihat lebih jelas. Hal ini ditandai oleh

peningkatan pada distorsi bentuk gelombang, amplitude frekuensi harmonik ganjil terutama 150 Hz, dan THD. Berdasarkan spektrum harmonik dan periode gelombang, respons ferroresonansi diidentifikasi sebagai mode fundamental. Efek kondisi inisial, seperti fluks sisa inti transformator dan muatan awal kapasitor, juga terlihat pada distorsi puncak gelombang kondisi transien. Di samping itu, perbedaan bentuk gelombang antara kondisi normal dan ferroresonansi lebih mudah diamati pada tegangan daripada arus. Bentuk gelombang arus dan tegangan hasil pengujian telah diverifikasi melalui simulasi.

Kata Kunci—Pengisian daya transformator, *Fast Fourier Transform* (FFT), ferroresonansi, spektrum harmonik, *Total Harmonic Distortion* (THD).

I. PENDAHULUAN

Istilah ferroresonansi dikenal pertama kali di tahun 1920 sebagai sebuah fenomena osilasi yang melibatkan induktans nonlinier, kapasitans, sumber tegangan *sinusoidal*, dan rugi-rugi yang rendah [1]. Pada umumnya, kemunculan osilasi ini di lapangan dipicu oleh gangguan transien yang mampu menyebabkan inti transformator bersaturasi. Respons ferroresonansi ditandai oleh gelombang arus dan tegangan abnormal, seperti tingkat harmonik, nilai puncak, ataupun nilai efektif. Dengan adanya efek tersebut, ferroresonansi memberikan tekanan dielektrik dan termal yang mampu merusak peralatan listrik dan berujung pada pemadaman listrik (*black out*). Di samping itu, kemunculan fenomena ini tidak dapat diprediksi secara pasti dan *relay* proteksi pun dapat bekerja secara tidak tepat ketika ferroresonansi terjadi [2]. Hal inilah yang menjadikan fenomena ferroresonansi, terutama karakteristik fisiknya, masih mendapatkan perhatian khusus dalam sistem tenaga listrik hingga saat ini.

Ferroresonansi yang juga disebut sebagai *ferromagnetic resonance* berbeda dengan resonansi [3]. Jika resonansi hanya melibatkan induktans pada area linier (nonsaturasi), ferroresonansi turut melibatkan induktans pada area nonlinier (saturasi) yang bernilai jauh lebih kecil. Interaksi antara nilai-nilai induktans yang sangat berbeda dan kapasitans sistem menghasilkan karakteristik alamiah, yaitu ferroresonansi sebagai fenomena dinamis yang nonlinier, seperti sensitif terhadap parameter dan kondisi inisial sistem dan adanya perubahan keadaan sistem (*state*) secara mendadak (*jump phenomenon*) [1].

Berdasarkan respons ferroresonansi dalam keadaan tunak (*steady state*), terdapat empat mode dasar yang dapat diidentifikasi, yaitu fundamental, subharmonik, kuasiperiodik, dan *chaotic*. Mode fundamental memiliki periode sebesar periode fundamental sistem, T_0 , dan disertai frekuensi

¹Dosen, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya, 60111, (telp: 031-594 7302; fax: 031-593 1237; e-mail: didit@ee.its.ac.id)

²Peneliti, Pusat Unggulan IPTEK bidang Sistem Kontrol Otomotif, Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya, 60111, (telp: 031-599 4251; e-mail: anton@ee.its.ac.id)

³Peneliti, Laboratorium Tegangan Tinggi, Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya, 60111.

harmonik sebesar kelipatan integer dari f_0 , sedangkan mode subharmonik memiliki periode sebesar kelipatan integer dari periode fundamental sistem, nT_0 , dan disertai frekuensi harmonik sebesar f_0/n . Mode kuasiperiodik dan *chaotic* tergolong nonperiodik dan disertai frekuensi harmonik yang lebih kompleks.

Studi feroresonansi berdasarkan metode dinamis yang nonlinier lebih sesuai dibandingkan metode matematis linier [4]. Studi berbasis simulasi memberikan hasil berdasarkan kejadian di lapangan, seperti kasus kemunculan feroresonansi akibat sambaran petir, gangguan hubung singkat, pengoperasian pemutus daya atau fase terlepas, dan ketidaksimetrisan distribusi fluks pada inti transformator tiga fase [5]-[14]. Selain itu, sensitivitas respons feroresonansi terhadap parameter dan kondisi inisial sistem dapat dipahami secara lebih mudah melalui simulasi [15], [16].

Studi berbasis pengujian mampu menjelaskan fenomena feroresonansi secara fisik sebagaimana karakteristik tersebut tidak dapat diperoleh melalui simulasi. Hal ini disebabkan oleh parameter dan kondisi sistem yang dimasukkan ke dalam rangkaian simulasi terbatas, sedangkan respons feroresonansi sangat sensitif terhadap kedua hal tersebut. Pengujian di lapangan (*field test*) tidak memungkinkan terutama karena faktor risiko yang tinggi [17]. Pengujian skala laboratorium (*downed scale*) dapat dijadikan sebagai pendekatan alternatif dalam memahami feroresonansi secara fisik [18]. Keunggulannya yaitu pengujian dapat terkontrol dan respons feroresonansi terekam dengan baik.

Pengujian inisiasi feroresonansi telah dilakukan pada transformator tegangan rendah satu fase dengan inti toroid dan jenis material M5 [19]. Variasi tegangan sumber dilakukan dengan menaikkan tegangan secara bertahap dan kontinu hingga mencapai sekitar dua kali dari tegangan nominal transformator. Selanjutnya, tegangan sumber diturunkan hingga bernilai nol. Melalui skema pengujian tersebut, kecenderungan respons feroresonansi pada tegangan kapasitor terhadap variasi tegangan sumber mampu dipahami. Akan tetapi, karakteristik tegangan dan arus transformator, seperti bentuk gelombang dan harmonik, tidak dijelaskan. Padahal, apabila kedua respons tersebut diketahui, maka efek kemunculan feroresonansi terhadap transformator dapat dipahami. Hal ini dikarenakan tingkat harmonik merupakan salah satu parameter kelayakan peralatan listrik [20]. Di samping itu, parameter deteksi feroresonansi dapat ditentukan berdasarkan karakteristik arus dan tegangan feroresonansi yang diperoleh.

Pada makalah ini, inisiasi feroresonansi dilakukan pada transformator tegangan rendah satu fase dengan inti E1 dan jenis material H18. Bentuk inti transformator tersebut digunakan secara umum di lapangan. Besar tegangan sumber dinaikkan secara tidak kontinu. Artinya, nilai tegangan sumber diatur sebelum penutupan pemutus daya (saklar) dilakukan. Skema ini merepresentasikan proses pengisian daya pada transformator. Respons arus dan tegangan primer transformator direkam dan diolah dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Lalu, spektrum harmonik dihitung nilai *Total Harmonics Distortion* (THD)-nya dan

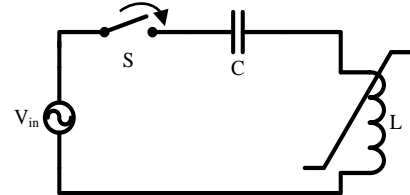
diidentifikasi ke dalam mode feroresonansi tertentu. Di samping itu, bentuk gelombang arus dan tegangan primer transformator dibandingkan dengan hasil simulasi ATPDraw.

II. PEMODELAN RANGKAIAN FERORESONANSI

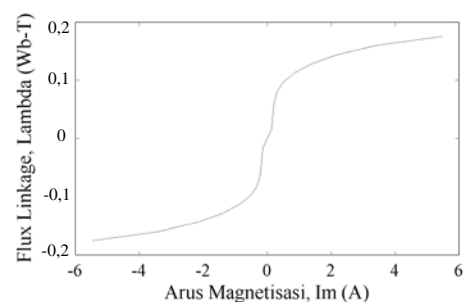
Feroresonansi merupakan fenomena resonansi nonlinier yang melibatkan interaksi antara induktans nonlinier dan kapasitans. Induktans nonlinier tersebut merupakan induktans yang bersifat feromagnetik dan dapat bersaturasi, seperti transformator daya, transformator pengukuran, dan *shunt reactor* [1]. Kapasitans berasal dari kabel, saluran transmisi, *Capacitive Voltage Transformers* (CVT), *capacitor banks*, dan *voltage grading capacitor* pada pemutus daya [1].

Di antara faktor-faktor pemicu feroresonansi, pengoperasian pemutus daya merupakan faktor yang paling umum dalam menginisiasi feroresonansi di lapangan. Hal ini disebabkan oleh intensitas terjadinya pengoperasian pemutus daya merupakan yang tertinggi dibandingkan dengan faktor-faktor pemicu feroresonansi lainnya, seperti sambaran petir dan hubung singkat. Salah satu contoh pengoperasian pemutus daya yaitu penutupan pemutus daya ketika pengisian daya transformator.

Inisiasi feroresonansi pada pengisian daya transformator direpresentasikan secara sederhana oleh rangkaian yang ditunjukkan pada Gbr. 1. V_{in} adalah tegangan sumber, C adalah kapasitor rangkaian (*lumped capacitor*), L adalah induktans nonlinier dari transformator daya, dan S sebagai pemutus daya (saklar).



Gbr. 1 Rangkaian dasar feroresonansi seri.



Gbr. 2 Kurva magnetisasi inti transformator.

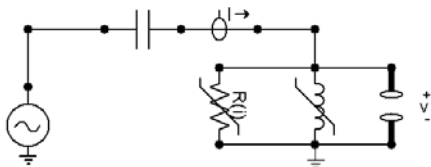
III. METODOLOGI

Rangkaian pengujian feroresonansi mengacu pada Gbr. 1. *Auto-transformator* ($V_{sekunder} = 0 - 240$ V) digunakan sebagai sumber tegangan, V_{in} . Besar kapasitans kapasitor dan *rating* transformator yaitu $C = 30$ uF dan $V_{primer} = 30$ V dengan kapasitas daya sebesar 200 VA [19]. Inti transformator berbentuk E1 dan berjenis material H18. Kurva magnetisasi inti transformator tersebut ditunjukkan pada Gbr. 2,

sedangkan ketidaklinieran nilai induktansnya ditunjukkan pada Tabel I. Sisi sekunder transformator dibiarkan tak berbeban (*no-load*) agar respons feroresonansi yang muncul paling signifikan [1].

TABEL I
KETIDAKLINIERAN INDUKTANS TERHADAP TEGANGAN PRIMER DAN ARUS MAGNETISASI TRANSFORMATOR

Tegangan Primer (V)	Arus Magnetisasi (A)	Induktans Inti (H)
5,11	0,136	0,119
10,77	0,166	0,205
15,56	0,191	0,258
20	0,223	0,285
25,5	0,312	0,259
30,5	0,5	0,193
35,5	0,861	0,131
40,3	1,394	0,092
45	2,155	0,066
50,3	3,408	0,046
55,1	5,472	0,032



Gbr. 3 Rangkaian simulasi feroresonansi.

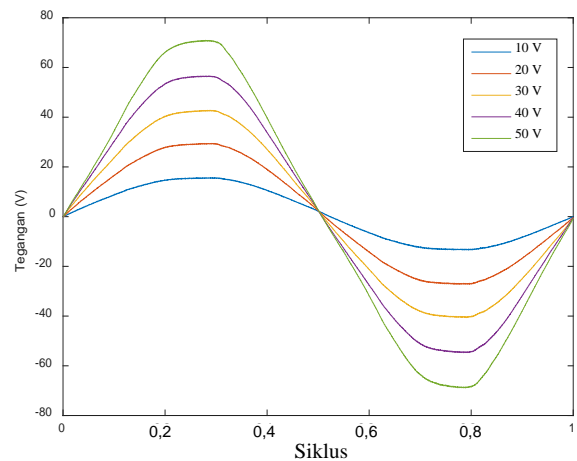
Pengujian diawali dengan memvariasikan tegangan sumber (10–50 V) pada transformator yang belum terhubung dengan kapasitor (kondisi normal). Setelah itu, pengujian dilanjutkan dengan pemberian tegangan sumber (10–100 V) pada transformator yang terhubung seri dengan kapasitor (kondisi feroresonansi). Variasi tegangan sumber dilakukan secara tidak kontinu. Nilai tegangan sumber diatur sebelum penutupan saklar. Setelah pada transformator dilakukan pengisian daya selama sekitar 5 detik, saklar dibuka. Kemudian pengujian dilanjutkan pada nilai variabel tegangan berikutnya. Muatan kapasitor dan fluks sisa inti transformator pasca pengisian daya tidak dihilangkan. Hal ini sekaligus akan menunjukkan efek kondisi inisial sistem terhadap respons feroresonansi.

Gelombang arus dan tegangan primer transformator diolah dengan menggunakan FFT untuk mendapatkan spektrum harmoniknya. Respons feroresonansi ditandai oleh kemunculan frekuensi nonfundamental dan diidentifikasi ke dalam mode tertentu. Kemudian THD tegangan, THD_v , dan THD arus, THD_i , dihitung berdasarkan persamaan berikut.

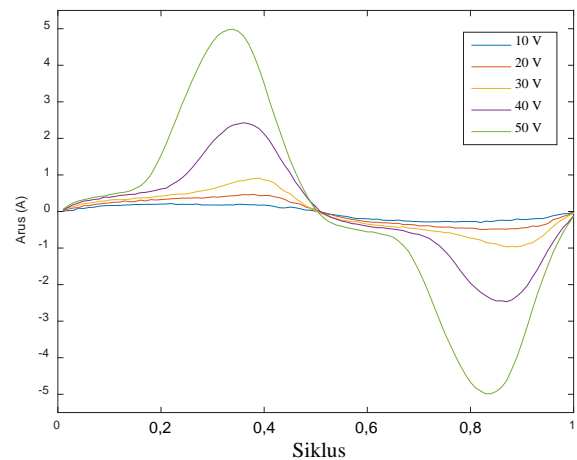
$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (1)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

dengan V_i adalah amplitude frekuensi harmonik tegangan ke- i , I_i adalah amplitude frekuensi harmonik arus ke- i , dan n adalah jumlah data frekuensi harmonik.



Gbr. 4 Tegangan primer pada tegangan sumber yang berbeda.



Gbr. 5 Arus primer pada tegangan sumber yang berbeda.

TABEL II
SPEKTRUM HARMONIK TEGANGAN KONDISI NORMAL

Frekuensi Harmonik ke-	Amplitude Frekuensi Harmonik (V) pada Tegangan Sumber:				
	10 V	20 V	30 V	40 V	50 V
1	14,6	28,5	41,9	55,2	67,5
2	0,02	0,01	0,07	0,21	0,25
3	0,09	0,23	0,54	1,57	3,72
4	0	0,03	0,08	0,05	0,02
5	0,13	0,22	0,39	0,75	0,87
6	0	0,02	0,05	0,02	0,01
7	0,08	0,19	0,29	0,41	0,60
8	0	0,01	0,03	0,02	0,03
9	0,02	0,03	0,02	0,08	0,23
10	0	0,01	0,03	0	0,01

Parameter pengujian dimodelkan ke dalam rangkaian simulasi ATPDraw seperti ditunjukkan pada Gbr. 3. Sisi primer transformator dimodelkan sebagai induktans nonlinier yang merepresentasikan efek saturasi inti, sedangkan rugi-rugi dimodelkan sebagai resistans nonlinier [19]. Tegangan sumber dinyalakan pada sudut fase 90° dengan variasi magnitudo, yaitu 10 V, 30 V, dan 100 V, sedangkan kapasitor bernilai konstan sebesar 30 uF.

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Kondisi Normal

Bentuk gelombang tegangan primer transformator dalam keadaan tunak diperlihatkan pada Gbr. 4, sedangkan bentuk gelombang arusnya ditunjukkan pada Gbr. 5. Bentuk gelombang tegangan menyerupai *sinusoidal* dengan puncak yang sedikit terdistorsi, sedangkan bentuk gelombang arus cenderung *non-sinusoidal*. Distorsi gelombang arus dan tegangan terlihat lebih jelas pada tegangan sumber yang lebih besar. Lalu, kedua gelombang ditransformasi oleh FFT dan diperoleh spektrum harmonik seperti ditunjukkan pada Tabel II dan Tabel III.

TABEL III
SPEKTRUM HARMONIK ARUS KONDISI NORMAL

Frekuensi Harmonik ke-	Amplitude Frekuensi Harmonik (A) pada Tegangan Sumber:				
	10 V	20 V	30 V	40 V	50 V
1	0,27	0,47	0,75	1,73	3,61
2	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01
3	0,03	0,09	0,23	0,68	1,35
4	0	0	0	0,01	0,01
5	0,01	0,02	0,07	0,12	0,10
6	0	0,01	0,01	0,01	0,01
7	0	0	0,02	0,02	0,06
8	0,01	0	0	0	0,01
9	0	0	0	0,01	0,03
10	0	0	0	0	0

TABEL IV
PERSENTASE THD ARUS DAN TEGANGAN KONDISI NORMAL

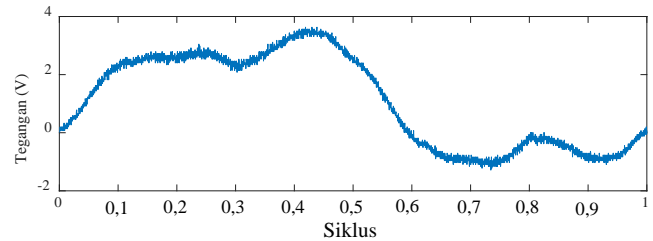
THD	% THD pada Tegangan Sumber:				
	10 V	20 V	30 V	40 V	50 V
THD_V	1,22	1,32	1,77	3,27	5,75
THD_I	14,7	19,7	32	40	37,5

Secara umum, bentuk gelombang tegangan dan arus lebih dipengaruhi oleh frekuensi harmonik ganjil daripada genap, terutama ketika tegangan sumber melebihi tegangan nominal transformator (kondisi saturasi). Hubungan yang berbanding lurus antara tegangan sumber dan frekuensi harmonik terlihat pada frekuensi ketiga, kelima, dan ketujuh untuk tegangan dan frekuensi ketiga untuk arus. Hasil penghitungan THD pada Tabel IV menunjukkan THD_V yang bernilai jauh lebih kecil daripada THD_I . Selain itu, THD_V berbanding lurus terhadap tegangan sumber.

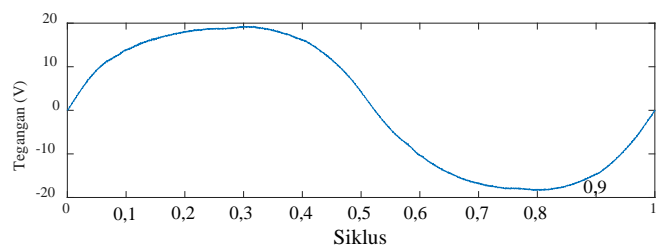
B. Pengujian Feroresonansi

Bentuk gelombang tegangan primer transformator dalam kondisi tunak ditunjukkan pada Gbr. 6 sampai Gbr. 13. Secara umum, bentuk gelombang tersebut tampak terdistorsi dan berbeda dengan kondisi normal, seperti pada Gbr. 4. Distorsi gelombang tegangan terlihat semakin jelas pada tegangan sumber yang lebih besar, terutama pada kondisi saturasi. Bentuk gelombang pada Gbr. 6 yang lebih terdistorsi daripada Gbr. 7 dapat disebabkan oleh fluks sisa inti transformator (fluks dalam kondisi saturasi akibat transformator dikenai

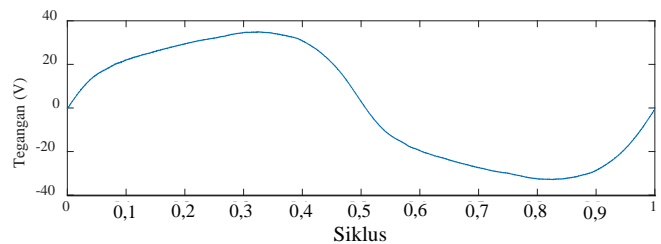
tegangan sebesar 50 V pada pengujian sebelumnya). Efek fluks sisa inti tersebut turut berdampak pada pengujian dengan tegangan sumber 20 V. Hal ini terlihat pada perubahan bentuk gelombang tegangan saat kondisi transien, seperti ditunjukkan pada Gbr. 14. Pada puncak gelombang terdapat riak (*ripple*) selama beberapa siklus (*cycle*). Kemudian riak menurun (menghilang) seiring dengan gelombang tegangan menuju keadaan tunak. Nilai satu siklus pada Gbr. 6 sampai Gbr. 13 adalah 20 ms, sehingga respons feroresonansi yang muncul tergolong mode fundamental.



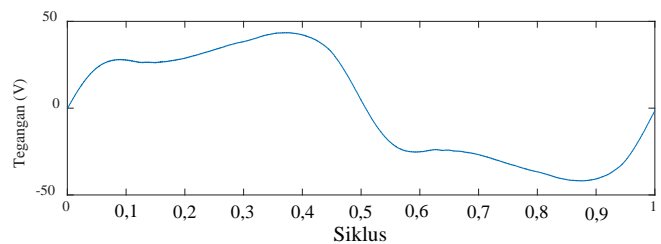
Gbr. 6 Tegangan primer hasil pengujian pada tegangan sumber 10 V.



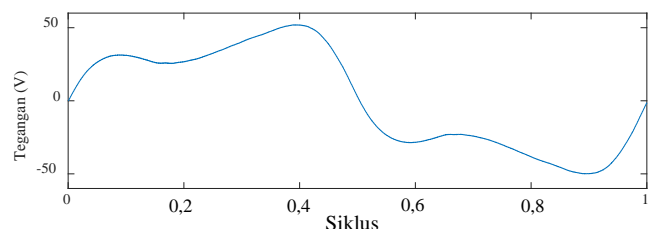
Gbr. 7 Tegangan primer hasil pengujian pada tegangan sumber 20 V.



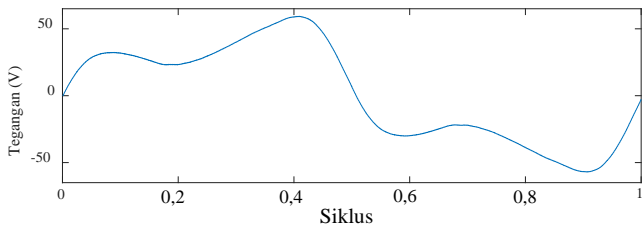
Gbr. 8 Tegangan primer hasil pengujian pada tegangan sumber 30 V.



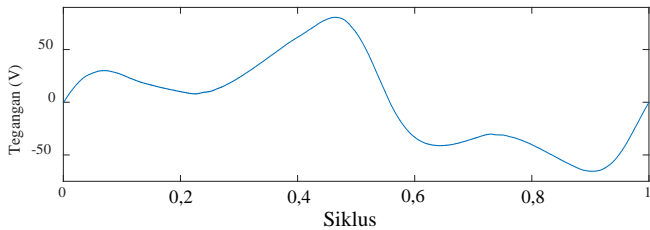
Gbr. 9. Tegangan primer hasil pengujian pada tegangan sumber 40 V.



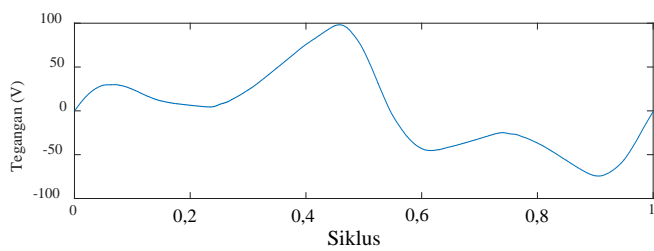
Gbr. 10 Tegangan primer hasil pengujian pada tegangan sumber 50 V.



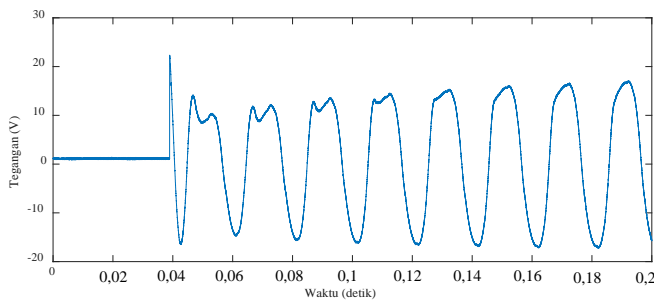
Gbr. 11 Tegangan primer hasil pengujian pada tegangan sumber 60 V.



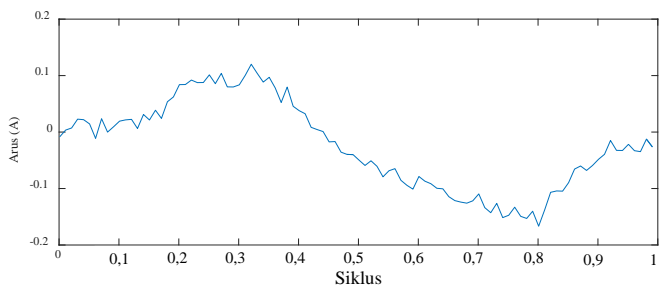
Gbr. 12 Tegangan primer hasil pengujian pada tegangan sumber 80 V.



Gbr. 13 Tegangan primer hasil pengujian pada tegangan sumber 100 V.



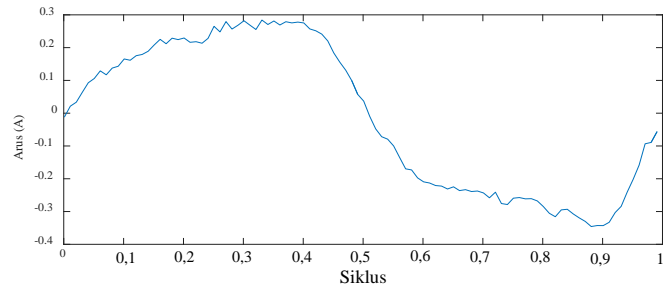
Gbr. 14 Kondisi transien gelombang tegangan primer pada tegangan sumber sebesar 20 V.



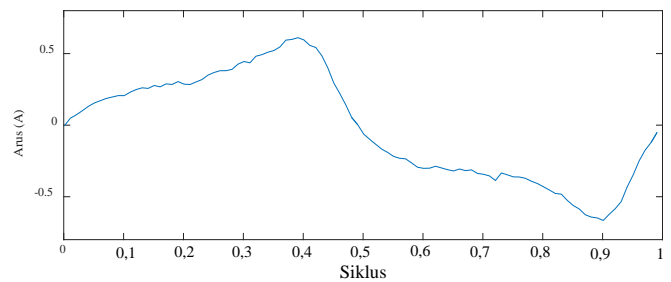
Gbr. 15 Arus primer hasil pengujian pada tegangan sumber 10 V.

Efek peningkatan tegangan sumber terhadap bentuk gelombang arus ditunjukkan pada Gbr. 15 sampai Gbr. 22. Bentuk gelombang tersebut terlihat mirip dengan bentuk gelombang ketika transformator belum terhubung dengan kapasitor, seperti pada Gbr. 5. Hal ini menimbulkan sedikit kesulitan untuk membedakan bentuk gelombang arus antara

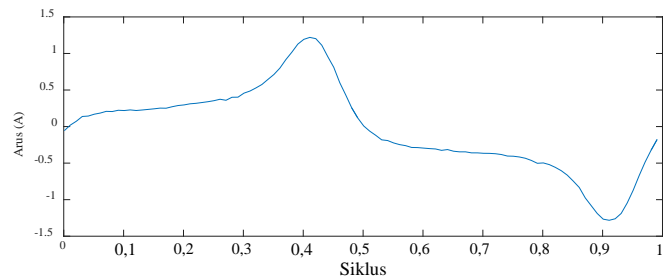
kondisi normal dan feroresonansi. Bentuk gelombang pada Gbr. 15 yang lebih terdistorsi daripada Gbr. 16 juga disebabkan oleh fluks sisa inti akibat pemberian tegangan sumber sebesar 50 V pada pengujian sebelumnya.



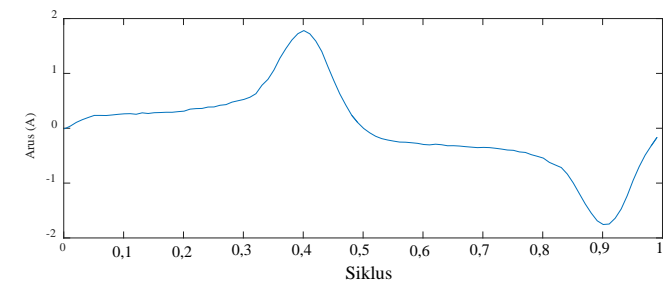
Gbr. 16 Arus primer hasil pengujian pada tegangan sumber 20 V.



Gbr. 17 Arus primer hasil pengujian pada tegangan sumber 30 V.

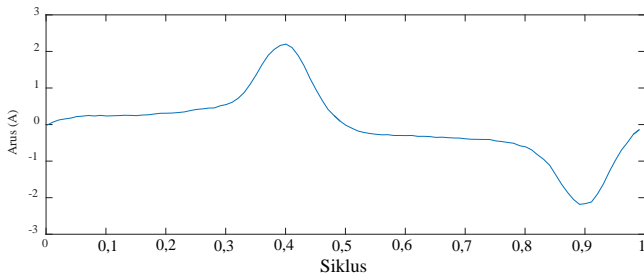


Gbr. 18 Arus primer hasil pengujian pada tegangan sumber 40 V.

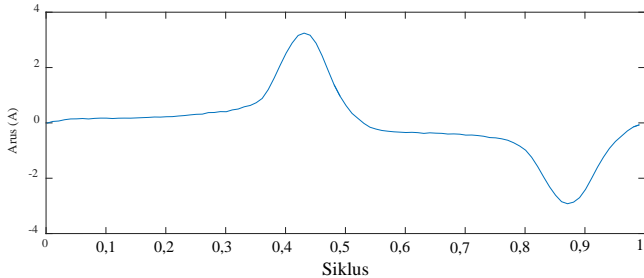


Gbr. 19 Arus primer hasil pengujian pada tegangan sumber 50 V.

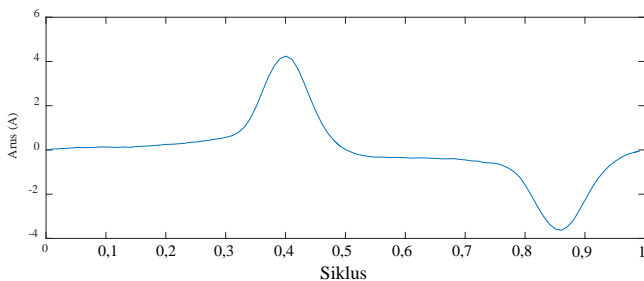
Spektrum harmonik tegangan, pada Tabel V, dan arus, pada Tabel VI, menjelaskan adanya hubungan yang berbanding lurus antara tegangan sumber dan frekuensi harmonik ketiga. Selain itu, amplitude frekuensi harmonik genap terlihat signifikan hanya pada tegangan sumber sebesar 80 V dan 100 V. Kemunculan frekuensi harmonik pertama hingga kesepuluh (kelipatan bilangan integer dari frekuensi fundamental) pada Tabel V dan Tabel VI semakin membuktikan bahwa respons feroresonansi yang diperoleh tergolong mode fundamental.



Gbr. 20 Arus primer hasil pengujian pada tegangan sumber 60 V.



Gbr. 21 Arus primer hasil pengujian pada tegangan sumber 80 V.



Gbr. 22 Arus primer hasil pengujian pada tegangan sumber 100 V.

Efek fluks sisa inti juga dapat diamati secara jelas pada nilai THD_V dan THD_I ketika tegangan sumber 10 V. Kedua THD tersebut bernilai lebih besar daripada ketika tegangan sumber 20 V, seperti terlihat pada Tabel VII. Secara umum, THD_V dan THD_I berbanding lurus terhadap tegangan sumber. Ketika tegangan sumber bernilai sama dengan tegangan nominal transformator, THD_V mencapai 15,9% dan THD_I mencapai 35,2%. Ketika tegangan sumber bernilai dua kali dari tegangan nominal transformator, THD_V mencapai 46,7% dan THD_I mencapai 68,9%. Di samping itu, nilai THD_V dan THD_I pada Tabel VII jauh lebih besar daripada Tabel IV.

C. Simulasi Feroresonansi

Hasil simulasi rangkaian feroresonansi menunjukkan bahwa bentuk gelombang tegangan, ditunjukkan pada Gbr. 23 sampai Gbr. 25, dan arus, ditunjukkan pada Gbr. 26 sampai Gbr. 28, menyerupai hasil pengujian pada Gbr. 6, Gbr. 8, dan Gbr. 13 untuk gelombang tegangan dan Gbr 15, Gbr. 17, dan Gbr. 22 untuk gelombang arus. Distorsi bentuk gelombang semakin signifikan seiring dengan pemberian tegangan sumber yang lebih besar. Bentuk tegangan pada Gbr. 23 yang lebih baik daripada Gbr. 6 semakin membuktikan bahwa hasil pengujian pada Gbr. 6 dipengaruhi oleh fluks sisa inti transformator (inti dalam kondisi saturasi akibat transformator

diberikan tegangan sebesar 50 V pada pengujian sebelumnya). Kondisi ini juga terlihat pada bentuk arus pada Gbr. 26 yang lebih baik daripada Gbr. 15.

TABEL V
SPEKTRUM HARMONIK TEGANGAN KONDISI FERORESONANSI

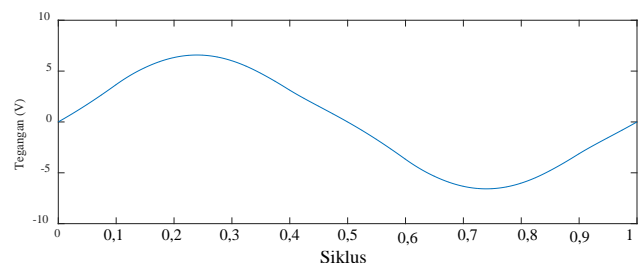
Frekuensi Harmonik ke-	Amplitude Frekuensi Harmonik (V) pada Tegangan Sumber:							
	10 V	20 V	30 V	40 V	50 V	60 V	80 V	100 V
1	2,12	20,3	35,7	41,8	44,6	46,5	49,5	52,3
2	0,25	0,96	0,15	0,42	0,28	0,74	18,3	18,5
3	0,68	2,13	5,48	11,9	17,1	20,9	24,5	31,7
4	0,05	0,28	0,07	0,25	0,12	0,29	9,40	10,0
5	0,13	0,41	1,38	3,66	4,68	5,33	3,79	6,10
6	0,01	0,06	0,03	0,15	0,13	0,16	3,35	3,71
7	0,11	0,20	0,55	0,90	0,96	1,55	1,20	2,06
8	0,01	0,02	0,03	0,07	0,07	0,09	0,94	1,12
9	0,01	0,04	0,14	0,27	0,34	0,48	0,28	0,16
10	0	0,01	0,02	0,05	0,03	0,06	0,24	0,41

TABEL VI
SPEKTRUM HARMONIK ARUS KONDISI FERORESONANSI

Frekuensi Harmonik ke-	Amplitude Frekuensi Harmonik (A) pada Tegangan Sumber:							
	10 V	20 V	30 V	40 V	50 V	60 V	80 V	100 V
1	0,10	0,31	0,50	0,72	0,91	1,07	1,38	1,69
2	0,02	0	0,01	0,01	0,01	0,02	0,38	0,34
3	0,02	0,06	0,16	0,35	0,51	0,64	0,77	1,05
4	0	0,01	0,01	0,01	0,02	0	0,44	0,43
5	0	0,02	0,06	0,18	0,26	0,34	0,31	0,52
6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,31	0,34
7	0	0,01	0,02	0,08	0,11	0,15	0,07	0,20
8	0	0	0	0	0,01	0,01	0,15	0,19
9	0	0	0,01	0,03	0,04	0,06	0,02	0,06
10	0	0,01	0,01	0	0	0	0,05	0,08

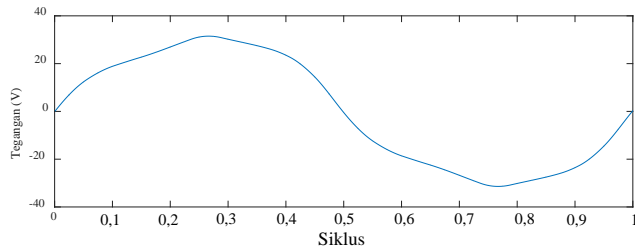
TABEL VII
PERSENTASE THD ARUS DAN TEGANGAN KONDISI FERORESONANSI

THD	% THD pada Tegangan Sumber:							
	10 V	20 V	30 V	40 V	50 V	60 V	80 V	100 V
THD_V	35,1	11,8	15,9	30,1	39,8	46,7	65,6	74,2
THD_I	26,9	22,1	35,2	55,8	64,1	68,9	78,3	81,1

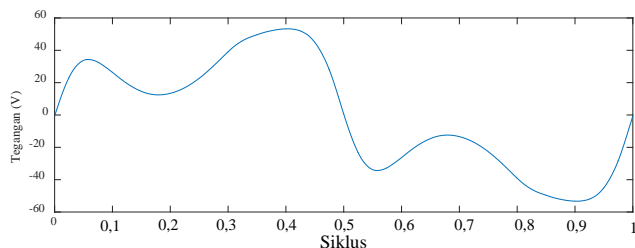


Gbr. 23 Tegangan primer hasil simulasi pada tegangan sumber 10 V.

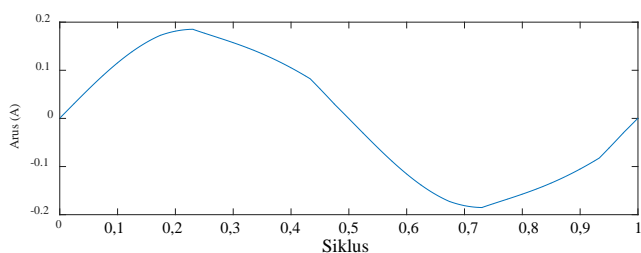
Amplitude arus dan tegangan hasil simulasi lebih kecil daripada hasil pengujian. Hal ini dapat disebabkan oleh faktor kondisi inisial sistem yang tidak terkontrol, seperti fluks sisa inti transformator, muatan awal kapasitor, dan sudut penyalaan saklar. Selain itu, sumber tegangan yang merupakan transformator variabel (*variac*) pada pengujian hanya dimodelkan sebagai sumber tegangan ac murni pada simulasi.



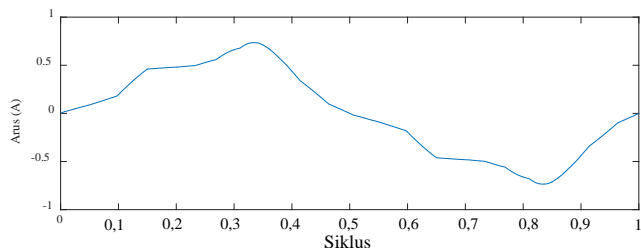
Gbr. 24 Tegangan primer hasil simulasi pada tegangan sumber 30 V.



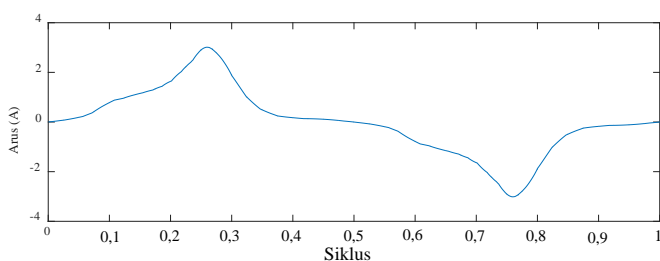
Gbr. 25 Tegangan primer hasil simulasi pada tegangan sumber 100 V.



Gbr. 26 Arus primer hasil simulasi pada tegangan sumber 10 V.



Gbr. 27 Arus primer hasil simulasi pada tegangan sumber 30 V.



Gbr. 28 Arus primer hasil simulasi pada tegangan sumber 100 V.

V. KESIMPULAN

Pengujian yang dilakukan telah mampu menginisiasi feroresonansi. Perbedaan bentuk gelombang antara kondisi sebelum dan setelah transformator terhubung dengan kapasitor terlihat lebih jelas pada tegangan daripada arus. Hal ini menjadikan respons feroresonansi lebih mudah diamati (dideteksi) pada gelombang tegangan daripada arus.

Peningkatan tegangan sumber menyebabkan respons feroresonansi terlihat lebih jelas, terutama ketika tegangan sumber melebihi tegangan nominal transformator (kondisi saturasi). Hal ini dapat diamati pada peningkatan tegangan sumber yang berbanding lurus terhadap distorsi bentuk gelombang, amplitude frekuensi harmonik ketiga, dan THD. Selain itu, amplitude frekuensi harmonik genap yang terlihat signifikan hanya ditemui pada tegangan sumber sebesar 80 V dan 100 V.

Respons feroresonansi yang diperoleh tergolong mode fundamental. Hal ini dibuktikan oleh kemunculan frekuensi harmonik pertama hingga kesepuluh (kelipatan bilangan integer dari fundamental) dan periode gelombang sebesar 20 ms. Variasi tegangan sumber yang diberikan tidak memengaruhi (mengubah) mode feroresonansi yang muncul.

Efek fluks sisa inti transformator (fluks dalam kondisi saturasi akibat pemberian tegangan melebihi tegangan nominal transformator pada pengujian sebelumnya) memengaruhi respons feroresonansi pada tegangan sumber 10 V. Selain itu, efek fluks sisa inti dan muatan awal kapasitor menimbulkan riak pada puncak gelombang tegangan selama kondisi transien pada tegangan sumber 20 V.

Secara keseluruhan, hasil penelitian telah mampu menunjukkan sensitivitas respons feroresonansi terhadap perubahan parameter dan kondisi inisial sistem secara fisik. Di samping itu, karakteristik arus dan tegangan yang telah diperoleh, terutama nilai THD-nya, mampu menjelaskan tingkat efek feroresonansi terhadap transformator. Selanjutnya, karakteristik bentuk gelombang dapat dijadikan pertimbangan dalam penentuan parameter deteksi sinyal feroresonansi pada penelitian berikutnya.

REFERENSI

- [1] P. Ferraci, "Cahier technique no. 190: Ferroresonance", Schneider Electric, Technical Report, hal. 1-28, 1998.
- [2] E. Price, "A Tutorial on Ferroresonance", *40th Annual Western Protective Relay Conference*, 2013, hal. 676-704.
- [3] S. V. Vonsovskii, *Ferromagnetic Resonance: The Phenomenon of Resonant Absorption of a High-Frequency Magnetic Field in Ferromagnetic Substances*, Oxford: Pergamon Express, 1966.
- [4] Z. Emin, B.A.T. Al Zahawi, D.W. Auckland, dan Y.K. Tong, "Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformer: A Study Based on Nonlinear Dynamics", *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 144, No. 4, hal. 383-387, 1997.
- [5] I.G.N.S. Hernanda, I.M.Y. Negara, A. Soeprijanto, Novandi, dan M. Wahyudi, "Ferroresonance Characteristics due to Lightning Strike on Capacitive Voltage Transformer", *International Review on Modelling and Simulations*, Vol. 9, No. 4, hal. 306-311, 2016.
- [6] J.S.P. Sinuraya, I.M.Y. Negara, dan I.G.N.S. Hernanda, "Analysis of Capacitance Effect on Ferroresonance of Power System (in Indonesian)", Skripsi, Electrical Engineering Dept., Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2016.

- [7] A.H.A. Bakar, "Analysis of Lightning-caused Ferroresonance in Capacitor Voltage Transformer (CVT)", *Electrical Power and Energy System*, vol. 33, Issue 9, hal. 1536-1541, 2011.
- [8] J. F. Piñeros, J. A. Vélez, dan D. Rodríguez, "Ferroresonance in a 115 kV Network due to a Single Line Fault", *International Conference on Power Systems Transients*, 2015, hal. 1-7.
- [9] M. Sanaye-Pasand, R. Aghazadeh, dan H. Mohseni, "Ferroresonance Occurrence During Energization of Capacitive Voltage Substations", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2003, hal. 601-606.
- [10] Tahir Cetin Akinci, Nazmi Ekren, Serhat Seker, dan Sezen Yildirim, "Continuous Wavelet Transform for Ferroresonance Phenomena in Electric Power Systems", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 44, Issue 1, hal. 403-409, 2013.
- [11] M. Graovac, R. Iravani, X. Wang, dan R.D. McTaggart, "Fast Ferroresonance Suppression of Coupling Capacitor Voltage Transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 1, hal. 158-163, 2003.
- [12] S.J. Huang dan C.H. Hsieh, "Relation Analysis for Ferroresonance of Bus Potential Transformer and Circuit Breaker Grading Capacitance", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 51, hal. 61-70, 2013.
- [13] P. S. Moses dan M. A. S. Masoum, "Modelling Ferroresonance in Asymmetric Three-Phase Power Transformer", *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2009, hal. 1-6.
- [14] I.G.N.S. Hernanda, I.M.Y. Negara, A. Soeprijanto, D.A. Asfani, D. Fahmi, K. Andarini, dan M. Wahyudi, "Detection of Ferroresonance on Asymmetric Three Phase Transformer due to Capacitance Variation", *AUN/SEED-Net Regional Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2017.
- [15] H. Abdi, S. Abbasi, dan M. Moradi, "Analyzing the Stochastic Behavior of Ferroresonance Initiation Regarding Initial Conditions and System Parameters", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 83, hal. 134-139, 2016.
- [16] K. Milicevic dan Z. Emin, "Impact of Initial Conditions on the Initiation of Ferroresonance", *Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 31, Issue 4, hal. 146-152, 2009.
- [17] K. Pattanapakdee dan C. Banmongkol, "Failure of Riser Pole Arrester due to Station Service Transformer Ferroresonance", *International Conference on Power Systems Transients*, 2007, hal. 1-5.
- [18] M. Roy dan C.K. Roy, "Experiments on Ferroresonance at Various Line Conditions and Its Damping", *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, 2008, hal. 1-8.
- [19] K. Milicevic, dan Z. Emin, "Initiation of Characteristic Ferroresonance States Based on Flux Reflection Model", *IEEE Transactions On Circuits and Systems II: Express Briefs*, Vol. 60, No. 1, hal. 51-55, 2013.
- [20] F. A. Samman, R. Ahmad, dan M. Mustafa, "Perancangan, Simulasi dan Analisis Harmonisa Rangkaian Inverter Satu Fasa", *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, Vol. 4, No. 1, hal. 62-70, Februari 2015.