

Review pengaruh penetrasi photovoltaic terhadap loss of life dan kinerja transformator

Rahman Azis Prasajo¹, Rohmanita Duanaputri², Jamik Apriliasari³, Rosina Ahda Dini⁴, Devi Soviati Mahmudah⁵

e-mail: rahmanazisp@polinema.ac.id, rohmanitar@polinema.ac.id, jamikapriliasari@gmail.com, rosinaadini@gmail.com, devisoviati03@gmail.com

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 18 September 2022

Direvisi 20 Oktober 2022

Diterbitkan 28 Oktober 2022

Kata kunci:

Transformator Distribusi

Pembebanan

Loss of Life

Efek Harmonisa

Fotovoltaik

ABSTRAK

Salah satu peralatan yang penting dalam sistem distribusi tenaga listrik adalah transformator. Penuaan transformator disebabkan oleh kerusakan isolasi yang diakibatkan dari proses degradasi kimia yang terakselerasi oleh oksidasi dan peningkatan suhu. Maka dari itu, untuk menilai loss of life transformator yang paling umum digunakan adalah menggunakan karakteristik thermal transformator. Peningkatan penggunaan photovoltaic (PV) yang mulai menyebar di berbagai daerah adalah salah satu bukti mulai diandalkannya energi terbarukan. Hal ini membawa dampak positif maupun negatif, baik bagi sistem tenaga secara keseluruhan, maupun bagi peralatan listrik. Artikel ini membahas berbagai penelitian terdahulu yang meneliti tentang pengaruh penggunaan PV terhadap penurunan kondisi transformator distribusi. Artikel review ini dibagi menjadi tiga bagian. Yang pertama membahas tentang akibat pemasangan PV yang mempengaruhi kinerja dari isolasi transformator berdasarkan pembebanan yang dialami saat operasi. Yang kedua membahas tentang pengaruh harmonisa yang dihasilkan oleh sistem PV terhadap penuaan transformator. Yang terakhir membahas tentang beberapa penelitian terdahulu yang membahas pendekatan untuk mengatasi harmonisa pada sistem.

ABSTRACT

One of the most important equipment in an electric power distribution system is a transformer. Transformer aging is caused by insulation breakdown resulted from chemical degradation processes that are accelerated by oxidation and increasing temperature. To assess the loss of life of the transformer, the most commonly used is to use the thermal characteristics of the transformer. The increasing use of photovoltaic which is starting to spread in various regions is one proof that renewable energy is starting to be relied on. This has both positive and negative impacts, both for the power system as a whole and for electrical equipment. This article discusses various previous studies that examined the effect of the use of photovoltaic on the deterioration of the distribution transformer condition. This review article is divided into three parts. The first is the effect of PV penetration which affects the performance of the transformer insulation based on the loading during operation. The second is the effect of harmonics generated by the PV system on the transformer aging. The last is to discuss some of the previous studies that proposed methods in reducing harmonics in the system.

Penulis Korespondensi:

Rahman Azis Prasajo,

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang

Jl. Tertentu No. 9, Malang, Jawa Timur, Indonesia.

Email: rahmanazisp@polinema.ac.id

1. PENDAHULUAN

Pada perkembangan sistem penyaluran energi listrik di era modern saat ini, penggunaan energi terbarukan dikembangkan secara signifikan oleh pemerintah. Pemasangan dan penggunaan *photovoltaic* (PV) yang mulai menyebar di berbagai daerah menjadi salah satu bukti energi terbarukan mulai diandalkan baik itu dari penggunaan *photovoltaic* (PV) pada instalasi konsumen maupun pada fasilitas umum untuk masyarakat. Pada dasarnya pemasangan sistem PV ini memiliki banyak manfaat diantaranya energi yang lebih ramah lingkungan, penggunaan PV juga dapat mengurangi biaya tagihan listrik dari jaringan, serta penggunaan PV juga dapat berkontribusi untuk mengurangi pemanasan global dan sebagai alternatif dari ketergantungan listrik konvensional. Beberapa studi melaporkan bahwa penggunaan PV pada sistem distribusi sangat berpengaruh pada tegangan dan aliran daya pada jaringan. Sistem distribusi secara umum dirancang untuk beban tertentu sesuai dengan kebutuhan konsumen, namun ketika PV terpasang maka pola kebutuhan akan berubah dan akan berdampak pada aliran daya pada jaringan.

Studi mengenai PV banyak dilakukan di Australia, karena hal ini menjadi salah satu program pemerintah untuk mengembangkan penggunaan PV. Dalam studi beberapa jurnal mengenai PV, penambahan PV pada sistem tidak secara langsung mengurangi beban puncak, tetapi akan mengurangi energi yang dihasilkan. Akibatnya adalah faktor beban serta rasio rata-rata beban puncak akan berkurang, hal ini sangat berpengaruh pada pembebanan transformator dalam sistem [1]. Arus harmonisa yang terinjeksi ke dalam sistem tenaga listrik dapat menimbulkan efek yang merugikan pada peralatan sistem tenaga listrik terutama pada transformator [2]. Sehingga hal tersebut akan mempengaruhi *lifetime*, kualitas, dan dapat mempercepat *loss of life* (LOL) dari transformator tersebut. Hal ini yang perlu diperhatikan dalam penggunaan PV pada sistem.

2. METODE

Pada artikel ini dilakukan review terhadap artikel penelitian terdahulu yang relevan pada sumber ilmiah. Penelusuran sumber untuk memperoleh artikel relevan dilakukan melalui portal seperti google scholar, scopus, elsevier, springer, dan sebagainya. Mayoritas artikel yang dikumpulkan adalah artikel baru dengan maksimal 10 tahun. Dilakukan identifikasi, evaluasi, dan sintesis terhadap karya yang dihasilkan para peneliti terdahulu. Hasil penelitian disajikan secara deskriptif, dan diringkas dalam bentuk tabel. Artikel review ini dibagi menjadi tiga bagian. Yang pertama membahas tentang akibat pemasangan PV yang mempengaruhi kinerja dari isolasi transformator berdasarkan pembebanan yang dialami saat operasi. Yang kedua membahas tentang pengaruh harmonisa yang dihasilkan oleh sistem PV terhadap penuaan transformator. Yang terakhir membahas tentang beberapa penelitian terdahulu yang membahas pendekatan untuk mengatasi harmonisa pada sistem.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh penggunaan pv pada insulation life transformator

Implementasi *Photovoltaic* (PV) sebagai energi terbarukan telah banyak diteliti, namun belum banyak yang membahas mengenai dampak apa saja yang akan timbul akibat meningkatnya penggunaan PV terhubung ke grid. Salah satu dampak yang timbul akibat pemasangan PV ini adalah kepada kinerja dari isolasi transformator. Isolasi transformator sendiri dapat menjadi salah satu faktor penentu masa pemakaian transformator [3], [4].

Sebuah transformator yang beroperasi pada suhu lebih rendah dapat mengakomodasi pertumbuhan beban tambahan dan memungkinkan utilitas untuk menunda pengadaan transformator baru sampai benar benar dibutuhkan [1].

Sebagian studi melaporkan bahwa penuaan dari transformator disebabkan oleh kerusakan isolasi dan juga dielektrik yang dihasilkan dari proses degradasi kimia yang berakselerasi kuat dengan suhu [1]. Metodologi yang digunakan untuk mengetahui *loss of life* yang paling umum digunakan untuk oleh utilitas adalah temperatur minyak bagian atas (*top oil*) dan titik panas (*hot spot*), dengan perhitungan menggunakan model termal transformator [1], [5]

Untuk menentukan besar nilai hotspot ada beberapa faktor yang harus diperhatikan sesuai dengan IEEE C57.91. Metode yang digunakan untuk mengevaluasi bergantung pada besar nilai rugi transformator yang selanjutnya pada perhitungan durasi *loss of life* transformator. Transformator hotspot modeling, menentukan *Hot Spot Temperature* (HST) dinyatakan dalam celcius dengan menambah nilai temperatur top oil dengan arus beban dan nilai total perubahan HST [5]. *Loss of life* ditentukan sebagai umur yang dihitung dari isolasi belitan transformator yang memburuk sesuai dengan waktu dan suhu. Faktor lain adalah kadar air, kadar oksigen, dan kandungan asam, namun pada penelitian ini hanya mendasarkan faktor waktu dan suhu

sebagai parameter penelitian. Karena distribusi suhu yang beragam, bagian yang beroperasi pada suhu tertinggi biasanya mengalami kerusakan terbesar[5].

Pada penelitian [5], yang digunakan sebagai acuan penelitian adalah 2 kondisi operasi. Pola produksi unit PV diperoleh dari nilai yang dihitung dan dikumpulkan menggunakan pengukuran radiasi matahari selama tiga bulan uji coba, dan data smart meter diambil dalam interval 15 menit selama periode uji coba 8 bulan. Hasil profil suhu dengan kelebihan beban transformator puncak sebesar 40 persen di atas nameplate didapatkan. Tanpa pembangkitan PV, suhu minyak dan HST masing-masing mencapai 80°C dan 133°C, melebihi dari batas suhu hot-spot 110 ° C. Penambahan 64 kW (net) pembangkit PV menurunkan kriteria ini ke tingkat yang dapat diterima yaitu 114°C untuk suhu titik panas dan 70°C untuk suhu minyak. Dengan kondisi demikian terdapat penurunan yang signifikan pada tingkat LOL transformator sesuai dengan skenario. Tingkat pengurangan sangat tergantung pada tingkat penetrasi PV dan kemampuannya untuk menghasilkan daya saat paling dibutuhkan (yaitu, periode waktu di mana transformator kehilangan masa pakainya pada tingkat yang tinggi), serta bahan kertas dan rasio pembebanan dari transformator.

Tabel 1. Pengaruh penggunaan pv pada insulation life transformator

Author	Tahun	Parameter	Metode	Hasil penelitian
A. Kumari, J. Patra, N. Pal, N. Kumar [6]	2020	Hotspot temperature	<ul style="list-style-type: none"> • Pengukuran beban dan perhitungan HST serta LOL 	<ul style="list-style-type: none"> • PV memiliki dampak yang sangat besar terhadap kinerja transformator, yang dipengaruhi oleh beban pada transformator, tingkat penetrasi PV dan rating transformator. • LOL transformator berkurang 30% karena integrasi surya. Telah ditemukan bahwa karena kehadiran panel surya, HST transformator berkurang ke tingkat yang cukup besar (HST berkurang 49% ketika tingkat rata-rata penetrasi PV adalah 30% sepanjang tahun), ukuran transformator juga berkurang (dari 0,1 menjadi 0,06), dan umur transformator (sampai terjadinya gangguan eksternal) meningkat.
Bruno R. Baroni, Wadaed Urutbey, Andre M.G. Costa, Samuel P. Rocha [7]	2021	Loading of transformer, to oil temperature, hot-spot temperature,, loss of life.	<ul style="list-style-type: none"> • Monte carlo simulation 	<ul style="list-style-type: none"> • Dalam sembilan dari sebelas penyulang yang dianalisis, variasi tingkat penurunan kondisi transformator untuk penetrasi PV hingga 30% adalah rendah. • Namun untuk sistem dengan 40% penetrasi PV, banyak transformator mengalami degradasi yang semakin cepat, dan umur operasionalnya berkurang.
Houman Pezeshki, and Peter [1]	2013	Maximum oil and hot-spot winding temperatures	<ul style="list-style-type: none"> • Akuisisi data dan alokasi fasa • Membuat formula penuaan Thermal (LoL trafo distribusi, Hot-spot temperature, Suhu ambient, Pembangkitan PV rooftop, Profil beban, dan trafo distribusi) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pembangkitan energi PV pada grid dapat memperpanjang usia dari transformator distribusi baik 3 fasa maupun 1 fasa, namun pada keadaan lain seperti beban puncak dapat meningkatkan <i>losses</i> belitan secara signifikan.

Shady A. El Batawyand Walid G. Morsi [8]	2017	Parameter dari nameplate transformator dan model Thermal transformator	<ul style="list-style-type: none"> • Memodelkan thermal trafo distribusi. • Metode Markov Chain Monte Carlo (MCMC) • Memodelkan sistem distribusi kedua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan peningkatan penetrasi PV hingga 60% dapat mengurangi pembebanan dari trafo distribusi dan memperpanjang usia trafo. Namun, pada penetrasi PV diatas 60% membuat LOL (Loss of Life) dari trafo meningkat karena stress pada trafo akibat reverse power.
Kanhaiya Kumar, Ganesh B. Kumbhar [9]	2018	Data sistem bersama dengan data lingkungan, yaitu suhu dan iradiasi.	<ul style="list-style-type: none"> • Memodelkan simulasi sistem distribusi dengan MATLAB dan interface dari openDSS. • Memodelkan Loss of life isolasi transformator sistem ONAN. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menemukan bahwa injeksi daya PV dapat mengurangi penurunan usia trafo distribusi. Namun, dikarenakan konsumsi beban, penurunan penuaan trafo naik saat beban tidak besar tapi turun saat beban besar.
Kerry D. McBee[10]	2017	Tingkat penetrasi PV System	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluasi Profil beban • Analisis penuaan trafo 	<ul style="list-style-type: none"> • Level THD diatas 10% akan meningkatkan penuaan trafo pada kondisi operasi darurat (emergency operation). Pada operasi normal penuaan lebih dipengaruhi oleh beban.
Mohamed A. Awadallah, Bala Venkatesh [11]	2015	Ketidakeimbangan fasa harmonik dan temperatur inti dan belitan pada berbagai beban	<ul style="list-style-type: none"> • Analisa dari lahan solar panel berbasis data utilitas Canada dan model simulasi MATLAB. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan bahwa THD, <i>losses</i> dan efisiensi trafo meningkat seiring dengan peningkatan pembebanan inverter PV.
Qianyi Liu, Yong Li, Longfu Luo, Yanjian Peng, Yijia Cao[12]	2018	Arus harmonisa, impedansi dari filter daya pasif	<ul style="list-style-type: none"> • Metode filter induktif 2 stage pada PV power plant. • Strategi kontrol dari PV inverter 	<ul style="list-style-type: none"> • Melakukan manajemen kualitas daya pada pembangkit PV menggunakan 2 langkah filterisasi harmonisa.

Tergantung pada kondisi pembebanan, tingkat penetrasi yang berbeda dari PV mungkin memiliki efek termal yang berbeda pada transformator, yang dapat mempengaruhi waktu hidup isolasi transformator [8]. Loss of life pada transformator tidak hanya berdasarkan titik hot spot namun juga panas dari isolasi minyak. Besar pembebanan transformator juga menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi loss of life. Dari besar nilai pembebanan inilah yang akan mempengaruhi penggunaan dari PV dan juga transformator. Sesuai dengan penjelasan pada [8], dengan meningkatnya penetrasi sumber listrik yang berbeda termasuk PV menghasilkan LOL transformator menurun sebanding dengan peningkatan penetrasi pada distribution grid dan penurunan titik jenuh isolasi setelah penetrasi tertentu tergantung pada teknologi distribution grid yang terpasang. Penelitian ini menggunakan data parameter transformator 25 kVA dan 50kVA. Pengamatan dilakukan selama 24 jam. Data yang diambil sesuai dengan smart meter yang terpasang dengan tingkat pembebanan yang berbeda. Pada penelitian ini dilakukan dari pemberian penetrasi PV dari 0% hingga 100%. Pada penelitian mengenai tingkat penetrasi PV pada transformator yang dilakukan pada 10 pelanggan yang terpasang PV pada transformator 25kVA, data yang diambil dari adalah jumlah pelanggan, persen penetrasi PV, daya terukur, dan flux radiasi yang diterima oleh PV. Dampak Probabilistik PV Surya Atap pada 25-kVA Transformator Distribusi menghasilkan ada penurunan yang signifikan dari suhu titik panas belitan. Misalnya, pada pukul 1 siang, suhu titik panas belitan berkurang 30% (dari 130 °C menjadi 90 °C) dan 46% (dari 130 °C menjadi 70 °C). Pada transformator 25kVA, terdapat 10 pelanggan yang terhubung dengan daya total 23kW. Hasilnya menunjukkan bahwa LOL transformator menurun secara signifikan dengan peningkatan penetrasi PV hingga

60%. Namun, peningkatan LOL terlihat ketika tingkat penetrasi PV meningkat melebihi 60%, hal ini disebabkan oleh adanya daya balik, yang meningkatkan pembebanan pada transformator, tetapi dalam arah sebaliknya [8]. Hal ini juga terjadi pada transformator dengan kapasitas 50kVA. suhu titik panas belitan berkurang 25% (dari 123.5 °C menjadi 93 °C) dan 39% (dari 123.5 °C menjadi 75.5 °C). Pada nilai persen penetrasi 0%-20% dan 0%-60%. Pada perkiraan masa pakai transformator dalam tahun, ditunjukkan bahwa LOL transformator menurun secara signifikan dengan peningkatan penetrasi PV hingga 60%. Namun, peningkatan LOL terlihat ketika tingkat penetrasi PV meningkat melebihi 60%, hal ini disebabkan oleh adanya daya balik, yang meningkatkan pembebanan pada transformator, tetapi dalam arah sebaliknya[8].

Sesuai dengan [9], injeksi daya PV menyebabkan penurunan yang cukup besar dalam laju penuaan transformator. Namun demikian jumlah penetrasi PV harus diperhatikan, karena dengan terlalu banyaknya penetrasi PV pada suatu transformator mungkin terjadi mempercepat penuaan transformator pada kondisi beban rendah dan suplai PV tinggi. Beberapa penelitian terdahulu terkait hubungan antara isolasi transformator dan penetrasi PV dirangkum dalam Tabel 1. Berdasarkan penelitian terdahulu pada Tabel 1, pemasangan PV terhadap grid dapat mempengaruhi pembebanan trafo sehingga pembebanan trafo semakin berkurang sehingga dapat memperpanjang usia trafo. Namun, terjadi peningkatan penuaan trafo yang disebabkan oleh komponen pendukung PV seperti inverter yang menyebabkan harmonisa yang dapat mempengaruhi *losses* dan efisiensi trafo.

3.2 Pengaruh harmonisa yang dihasilkan PV pada usia isolasi transformator

Transformator distribusi secara umum dirancang dan dibuat untuk beroperasi pada frekuensi dasar [13]. Pada sistem terdapat dua jenis beban yaitu beban linear dan beban non linear. Dimana beban non linear ini dapat menyebabkan adanya arus terdistorsi atau harmonisa. Harmonisa merupakan gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan. Timbulnya harmonisa pada sistem ini dapat menyebabkan rugi-rugi (*losses*), suhu hotspot yang tinggi, degradasi bahan isolasi, penurunan kapasitas kerja serta dapat menyebabkan penurunan masa pakai transformator. Suhu lingkungan juga mempengaruhi suhu hotspot dan dapat mempengaruhi tingkat penuaan transformator[14].

Tabel 2. Pengaruh harmonisa yang dihasilkan pv pada usia isolasi transformator

Author	Tahun	Parameter	Metode	Hasil penelitian
Jalil Yaghoobi, et al. [16]	2020	Tingkat pembebanan, THD harmonisa, temperature rise	<ul style="list-style-type: none"> • Pengukuran pembebanan, harmonisa, dan perhitungan LOL 	<ul style="list-style-type: none"> • Harmonik frekuensi tinggi menghasilkan peningkatan rugi-rugi belitan sebesar 33%, sehingga <i>losses</i> yang lebih tinggi menyebabkan percepatan 22% dalam penuaan transformator.
Thango B, Jordaan J, Nnachi A[13]	2020	Rugi-rugi transformator dan Harmonisa	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluasi rugi-rugi pada transformator (rugi daya Eddy current, rugi bagian logam, pembebanan maksimum trafo) • Perhitungan kapasitas transformator akibat harmonisa 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Losses</i> pembebanan meningkat dengan distorsi arus dan menurunkan rating kapasitas
A. Kumari, J. Patra, N. Pal, N. Kumar [6]	2020	THD Harmonisa, tingkat penetrasi PV	<ul style="list-style-type: none"> • Pengukuran pembebanan, pengukuran harmonisa, perhitungan LOL 	<ul style="list-style-type: none"> • Panel surya memiliki dampak positif pada kinerja transformator sampai batas tertentu. • Namun efek harmonik yang ditimbulkan oleh panel surya berdampak negatif terhadap kinerja transformator. • Pembalikan daya juga merupakan salah satu dampak negatif penetrasi PV. Selanjutnya, frekuensi

				kerja OLTC meningkat sebesar 45% karena integrasi matahari, yang dapat meningkatkan risiko kegagalan transformator.
Bonginkosi A. Thango, Jacobus A. Joordan, Agha F. nnachi [13]	2021	Harmonics level, Hotspot temperature, <i>lossess</i> , derating	<ul style="list-style-type: none"> • Melihat pengaruh spektrum harmonisa berdasarkan prosedur derating pada IEEE C57.10-2018 	<ul style="list-style-type: none"> • Hasilnya menunjukkan bahwa rugi beban meningkat dengan arus beban terdistorsi dan dengan demikian pengurangan rating kapasitas dari transformator.
Soto D, Balathan-dayuthapani S, Edrington C [17]	2011	Kompensasi harmonisa dengan filter PV-APF	<ul style="list-style-type: none"> • Pengaruh beban non-linear penyebab harmonisa. • Penambahan filter untuk mengurangi harmonisa • Integrasi sistem PV dengan jaringan dan PHEV disimulasikan di PSCAD dan MATLAB. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Losses</i> trafo yaitu rugi inti dan rugi arus magnet dipengaruhi oleh beban PHEV.
Pourya Seyfi, Saeed Zahedi, Hojat Shojaei, Hamid Ghomi [18]	2022	Harmonisa, Partial Discharge, SEM image	<ul style="list-style-type: none"> • Eksperimen system isolasi transformator tegangan tinggi diberikan pulsa harmonisa, setelah itu diperiksa dampak terhadap partial discharge dan SEM dari isolasi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Transformator tegangan tinggi tanpa harmonik bekerja tanpa masalah dan memiliki masa pakai lebih lama dalam kondisi listrik yang sama.
Awadallah M, Xu T, Venkatesh B, Singh B [19]	2016	Efek inverter	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluasi dampak inverter pada transformator (efek teknologi inverter, output, sinyal frekuensi, efek filtering, efek jumlah inverter, dan efek belitan trafo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluasi kualitas daya pada trafo 3 fasa terhadap ketidakseimbangan beban karean inverter 1 fasa.
Milad Soleimani, Mladen Kezunovic [20]	2020	Kapasitas baterai, Hot spot temperature, Pembebanan, penetrasi PV	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan metode Monte Carlo simulation untuk memitigasi pengaruh charging EV menggunakan BESS dan pembangkitan PV 	<ul style="list-style-type: none"> • Pembangkitan PV dan BESS akan mengurangi Loss of Life transformator yang disebabkan oleh EV, dan pada saat yang sama menguntungkan secara ekonomis.
Elmoudi A, Lehtonen M, Nordman H [15]	2006	Dampak harmonisa	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluasi rugi-rugi akibat harmonisa dan pembebanan transformator. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan efek dari harmonisa terhadap LoL (Loss of Life) trafo 31.5 MVA.

Terdapat dua tipe harmonisa yaitu harmonisa tegangan dan harmonisa arus. Pada harmonisa tegangan dalam sistem tenaga, distorsi harmonisa tegangan sistem jauh di bawah 5% dan komponen harmonik tegangan kecil dibandingkan dengan komponen fundamentalnya. Sedangkan untuk harmonisa arus sangat berpengaruh

yang dapat menyebabkan *losses* tambahan pada belitan dan struktural komponen lainnya [15]. Sehingga variasi beban serta jumlah penetrasi pv akan mempengaruhi munculnya harmonisa pada transformator, digabung dengan efek temperatur lingkungan dapat mempercepat kemampuan isolasi dari transformator serta dapat mengurai kapasitas pembebanan dari transformator. Berdasarkan penelitian terdahulu pada Tabel 2, menunjukan penyebab LoL trafo dapat berkurang apabila terhubung dengan PV on-grid dikarenakan efek harmonisa yang muncul karena beban non-linier, perlengkapan dari PV seperti inverter menjadi penyumbang harmonisa yang meningkatkan rugi inti pada trafo distribusi. Sehingga dapat ditentukan letak akibat turunnya LoL ialah penggunaan beban non-linier pada PV.

3.3 Penggunaan filter untuk mengatasi harmonisa

Penggunaan beban non-linear pada sistem serta jumlah penetrasi PV ke sistem dapat menyebabkan meningkatnya suhu hot spot sebagai pengaruh munculnya arus harmonisa pada sistem, sehingga dapat mempercepat *lifetime* dari transformator tersebut. Hal ini terjadi karena pada saat suhu transformator naik, maka dapat mempengaruhi isolasi dari transformator. Beberapa penelitian telah mengusulkan penggunaan filter untuk mengatasi harmonisa pada sistem, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Penelitian yang membahas penggunaan filter untuk mengatasi harmonisa pada sistem

Author	Tahun	Parameter	Metode	Hasil penelitian
Lubis A [2]	2017	Daya reaktif berdasarkan biaya minimum, ukuran, kerugian dll.	<ul style="list-style-type: none"> • Pengukuran THDi menggunakan power quality analyzer • Pemodelan beban dengan MATLAB • Pemodelan kapasitor sebagai filter 	<ul style="list-style-type: none"> • Mereduksi arus harmonik 24,8% menjadi 0,28% menggunakan filter pasif LC sesuai IEEE 519-1992
Hoon Y, Radzi M, Hassan M, Mailah N, Amran M [21]	2017	Ekstaksi harmonic, pembangkitan arus referensi, regulasi tegangan kapasitor, kontrol arus.	<ul style="list-style-type: none"> • Menjelaskan struktur kontrol dan prinsip kerja APF Shunt. • Algoritma kontrol dibawah kondisi tegangan sumber yang ideal. • Modifikasi algoritma kontrol saat tegangan sumber tidak seimbang • Algoritma kontrol APF-Shunt berbasis inverter. 	<ul style="list-style-type: none"> • Melakukan review terhadap penggunaan SAPF (Shunt Active Power Filter) dalam meningkatkan mitigasi harmonisa.
Kadek Arya Wiguna, Wayan Rinas, I wayan A.W.[22]	2018	Upaya untuk meminimalisasi harmonisa pada sistem distribusi.	<ul style="list-style-type: none"> • Pemodelan sistem kelistrikan RSUD Klungkung pada ETAP • Perancangan parameter filter • Simulasi sistem dengan Damped filter 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan filter High Pass Damped untuk mereduksi THDv dan THDi dengan penurunan dapat mencapai 10,63%.
Asnil [23]	2020	Distorsi pada gelombang arus dan faktor daya.	<ul style="list-style-type: none"> • Perhitungan faktor daya dan harmonic • Studi simulasi dengan penerapan filter pasif untuk memperbaiki distorsi (induktor, filter resonant seri, filter resonant parallel, dan trap filter) 	<ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan filter pasif dapat menurunkan distorsi gelombang THD dan mengurangi nilai THD.

Salah satu pendekatan untuk mengatasi harmonisa tersebut dapat dilakukan dengan menambahkan filter pada sistem, salah satunya yang digunakan pada penelitian [17] yaitu inverter PV-APF (Active Power Filter). APF merupakan rangkaian inverter yang terhubung ke jaringan listrik. Inverter ini berfungsi sebagai sumber tegangan atau sumber arus yang membangkitkan anti harmonisa. Dimana pada rangkaian inverter tersebut tidak menghasilkan gelombang sinusoidal namun menghasilkan gelombang terdistorsi sebagai anti

harmonisa. Keuntungan penggunaan APF ini tidak tergantung dari impedansi jaringan listrik dan tidak sensitif terhadap perubahan parameter jaringan listrik dan dapat beradaptasi terhadap perubahan beban non linier. Berdasarkan penelitian terdahulu pada Tabel III, menunjukkan efek harmonisa tegangan dan arus dapat dikurangi dengan menambahkan filter harmonisa pasif maupun aktif, melalui beberapa penelitian terdahulu di tabel III dapat ditentukan solusi kedepannya untuk permasalahan pengurangan LoL dari trafo distribusi karena efek harmonisa ialah menggunakan filter harmonisa pada sistem distribusi.

4. KESIMPULAN

Penggunaan PV yang terpasang pada jaringan distribusi dilaporkan dapat memperlambat penuaan transformator karena berkurangnya pembebanan yang mengakibatkan meminimalisir kenaikan suhu, bahkan ketika permintaan beban terus meningkat saat matahari terbenam. Terhubungnya PV ke sistem menyebabkan penurunan yang signifikan pada tingkat *Loss of Life* (LOL) dari transformator distribusi. Tingkat LOL ini bergantung pada pembebanan transformator yang berkurang saat ada peningkatan penetrasi PV. Disisi lain, meningkatnya penetrasi PV ke sistem menyebabkan peningkatan harmonisa pada jaringan. Harmonisa diakibatkan oleh beban non-linear berupa inverter yang terhubung ke grid. Timbulnya harmonisa pada sistem ini dapat menyebabkan rugi-rugi (*losses*), sehingga meningkatkan suhu hotspot transformator, degradasi bahan isolasi, penurunan kapasitas kerja serta dapat menyebabkan penurunan masa pakai transformator. Mitigasi harmonisa dapat dilakukan beberapa cara diantaranya adalah pemasangan filter aktif atau pasif. Pemasangan filter diharapkan dapat mengurangi dampak negative dari penetrasi PV tinggi dengan mengkompensasi nilai harmonisa pada sistem. Dengan penetrasi PV di Indonesia yang terus meningkat, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait pengaruh kepada penuaan transformator sesuai dengan berdasarkan karakteristik sistem listrik dan lingkungan serta penyinaran matahari di Indonesia.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Pezeshki, P. J. Wolfs, dan G. Ledwich, "Impact of high PV penetration on distribution transformer insulation life," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 3, hal. 1212–1220, 2013.
- [2] A. R. Lubis, "Efektivitas Penggunaan Filter Pasif LC dalam Mengurangi Harmonik Arus," *J. Electr. Technol.*, vol. 2, no. 3, hal. 1–8, 2017.
- [3] R. A. Prasojo, K. Diwyacitta, Suwarno, dan H. Gumilang, "Transformer paper expected life estimation using ANFIS based on oil characteristics and dissolved gases (Case study: Indonesian transformers)," *Energies*, vol. 10, no. 8, 2017.
- [4] R. A. Prasojo, A. Setiawan, Suwarno, N. U. Maulidevi, dan B. A. Soedjarno, "Development of Power Transformer Remaining Life Model Using Multi-Parameters," in *2021 IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 2021, hal. 99–102.
- [5] H. Pezeshki, P. J. Wolfs, dan G. Ledwich, "Impact of high PV penetration on distribution transformer insulation life," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 3, hal. 1212–1220, 2014.
- [6] A. Kumari, J. Patra, N. Pal, dan N. Kumar, "Impact of Solar Panel on the Transformer Performance: A Case Study," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Electr. Eng.*, vol. 44, no. 3, hal. 1197–1206, 2020.
- [7] B. R. Baroni, W. Uturbey, A. M. G. Costa, dan S. P. Rocha, "Impact of photovoltaic generation on the allowed revenue of the utilities considering the lifespan of transformers: A Brazilian case study," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 192, no. July 2020, hal. 106906, 2021.
- [8] S. A. El Batawy dan W. G. Morsi, "On the impact of high penetration of rooftop solar photovoltaics on the aging of distribution transformers," *Can. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 40, no. 2, hal. 93–100, 2017.
- [9] K. Kumar dan G. B. Kumbhar, "The effect of solar power injection on aging of a distribution transformer," *2017 6th Int. Conf. Comput. Appl. Electr. Eng. - Recent Adv. CERA 2017*, vol. 2018-Janua, hal. 242–246, 2018.
- [10] K. D. McBee, "Transformer Aging due to High Penetrations of PV, EV Charging, and Energy Storage Applications," *IEEE Green Technol. Conf.*, hal. 163–170, 2017.
- [11] M. A. Awadallah, B. Venkatesh, dan B. N. Singh, "Impact of solar panels on power quality of distribution networks and transformers," *Can. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 38, no. 1, hal. 45–51, 2015.
- [12] Q. Liu, Y. Li, L. Luo, Y. Peng, dan Y. Cao, "Power Quality Management of PV Power Plant With Transformer Integrated Filtering Method," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, no. 3, hal. 941–949, 2019.
- [13] B. A. Thango, J. A. Jordaan, dan A. F. Nnachi, "Effects of current harmonics on maximum loading capability for solar power plant transformers," *2020 Int. SAUPEC/RobMech/PRASA Conf. SAUPEC/RobMech/PRASA 2020*, no. October 2021, 2020.

- [14] H. Maros dan S. Juniar, “PENGARUH PENGGUNAAN PHOTOVOLTAIC TERHADAP LOSS OF LIFE DAN KINERJA DARI TRANSFORMATOR YANG TERHUBUNG KE GRID,” hal. 1–23, 2016.
- [15] A. Elmoudi, M. Lehtonen, dan H. Nordman, “Effect of harmonics on transformers loss of life,” *Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, vol. 2007, hal. 408–411, 2007.
- [16] J. Yaghoobi, A. Alduraibi, D. Martin, F. Zare, D. Eghbal, dan R. Memisevic, “Impact of high-frequency harmonics (0–9 kHz) generated by grid-connected inverters on distribution transformers,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 122, no. May, hal. 106177, 2020.
- [17] D. M. Soto, S. Balathandayuthapani, dan C. S. Edrington, “Mitigation of PHEV charging impact on transformers via a PV-APF harmonic compensation technique: Application to V2G integration,” *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2011*, 2011.
- [18] P. Seyfi, S. Zahedi, H. Shojaei, dan H. Ghomi, “Investigation of the effects of mixed electric field stress on high voltage transformer insulation,” *Electr. Eng.*, vol. 104, no. 4, hal. 2267–2279, 2022.
- [19] M. A. Awadallah, T. Xu, B. Venkatesh, dan B. N. Singh, “On the Effects of Solar Panels on Distribution Transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 3, hal. 1176–1185, 2016.
- [20] M. Soleimani dan M. Kezunovic, “Economic Analysis of Transformer Loss of Life Mitigation Using Energy Storage and PV Generation,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2020-October, 2020.
- [21] Y. Hoon, M. A. M. Radzi, M. K. Hassan, dan N. F. Mailah, “Control algorithms of shunt active power filter for harmonics mitigation: A review,” *Energies*, vol. 10, no. 12, 2017.
- [22] I. K. A. Wiguna, I. W. Rinas, dan I. W. A. Wijaya, “Analisis Penggunaan Filter Damped untuk Mereduksi Total Harmonic Distortion (THD) di Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Klungkung,” *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 17, no. 2, hal. 159, 2018.
- [23] A. Asnil, “Unjuk Kerja Filter Pasif dalam Mereduksi Distorsi Gelombang pada AC/DC Konverter,” *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 2, hal. 122, 2020.