

ANALISIS KINERJA TRANSFORMATOR TIGA BELITAN SEBAGAI GENERATOR STEP-UP TRANSFORMER

Harrij Mukti K⁶

Pada pusat pembangkit tenaga listrik, generator step-up transformer merupakan salah satu peralatan utama yang digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran generator untuk dapat mensuplai jaringan transmisi 70 kV, 150 kV, maupun 500 kV.

Transformator tiga belitan ini memiliki keunggulan dibandingkan dengan apabila dipasang dua buah transformator dua belitan. Antara lain ditinjau dari lebih tingginya nilai efisiensi, baik dilihat dari nilai rugi-rugi transformator maupun dilihat dari efisiensi rata-rata harian.

Bila ditinjau dari sisi kinerja operasi transformator tiga belitan, meskipun transformator mempunyai 2 buah masukan tetapi bila salah satu turbin gas tidak beroperasi karena ada kerusakan atau untuk pemeliharaan, transformator tetap dapat beroperasi dengan hanya satu buah masukan.

Kelemahan dari transformator tiga belitan sebagai transformator step-up pada dua generator adalah jika terjadi gangguan pada transformator yang menyebabkan tripnya PMT maka dua generator tidak dapat mensuplai daya ke beban, tetapi hal ini tidak terjadi jika menggunakan dua transformator dua belitan sebagai generator step-up transformer karena jika terjadi kerusakan pada salah satu transformator maka masih ada satu generator yang dapat mensuplai daya ke beban.

Kata-kata Kunci: transformator, generator step-up transformer

Abstract

In power plants, generator step-up transformer is one of the main equipment that is used to raise the output voltage generator to supply transmission line s 70 kV, 150 kV, and 500 kV.

Three-winding transformer has more advantages compared with an attached two units two winding transformers. Among other are higher efficiency value, in terms of value and transformer losses seen from the daily average efficiency.

⁶ Harrij Mukti K. Dosen Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang

The three-winding transformer has two inputs but when one of the gas turbine is not operating because there is damage or maintenance, transformers are expected to operate with only a single input.

The weakness of the three winding transformer as a step-up transformer from two generators is if there is interference on the transformer causing PMT to trip and two generators can not supply power to the load. But this is not a problem if two units two winding transformer is used as generator step-up transformers because if there is damage to one of the transformer then there is still a generator that can supply power to the load.

Keywords: *transformer, generator step-up transformer*

1. PENDAHULUAN

Pada pusat pembangkit tenaga listrik transformator merupakan salah satu peralatan utama yang digunakan untuk menaikkan tegangan sebelum pembangkit dapat mensuplai jaringan transmisi 70 kV, 150 kV, maupun 500 kV. Pada saat ini untuk pembangkit berkapasitas besar cenderung menggunakan transformator 3 belitan, antara lain yang terdapat pada PLTGU Grati. Saat ini telah terpasang dua transformator dengan 3 belitan, dimana terdapat 2 belitan primer dan 1 belitan sekunder. Kedua belitan primer disuplai oleh 2 generator gas turbin masing-masing berkapasitas 150 MW/10,5 kV dan sekundernya disalurkan ke GITET (Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi) dan mensuplai jaringan transmisi.

Dipasangnya transformator 3 belitan ini memiliki beberapa pertimbangan dibandingkan dengan apabila dipasang 2 buah transformator 2 belitan. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan menganalisis kelebihan atau bahkan kekurangan yang terjadi dari dipasangnya transformator tiga belitan ini bila dibandingkan dengan penggunaan dua buah transformator dua belitan.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kinerja Transformator

Dalam segi sistem kelistrikan mulai dari pembangkit, transmisi, distribusi dan konsumsi, transformator memegang peranan penting sebagai penyalur daya dengan cara mengubah besaran tegangan.

Kinerja operasi transformator ini dapat dilihat dari efisiensi, regulasi tegangan dan aliran arus beban dari transformator tersebut. Serta bagaimana transformator tetap dapat beroperasi dalam sistem dalam keadaan normal maupun keadaan darurat.

2.1.1 Efisiensi Transformator

Efisiensi suatu transformator berbeban pada faktor daya tertentu sama dengan daya keluar dibagi daya masuk, dimana kedua satuannya diukur dalam unit yang sama (watt atau kilowatt). Cara yang lebih baik adalah dengan cara menentukan rugi-rugi dan kemudian menentukan efisiensinya:

$$\eta = \frac{\text{dayakeluar}}{\text{dayamasuk}} = \frac{\text{dayakeluar}}{\text{dayamasuk} + \Sigma \text{rugi}} = 1 - \frac{\Sigma \text{rugi}}{\text{dayamasuk}} \quad (1)$$

$$\text{Dengan } \Sigma \text{ rugi} = P_{cu} + P_i$$

Rugi pada Transformator

1) Rugi tembaga (PCu)

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga, "besarnya rugi tembaga sebanding dengan kuadrat arusnya".

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R \quad (2)$$

Dimana:

P_{cu} = Rugi tembaga pada transformator (watt)

I = Arus yang mengalir pada transformator (ampere)

R = Tahanan belitan (ohm)

2) Rugi besi (Pi)

a. Rugi histerisis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi. Adanya fenomena histerisis pada inti merupakan kecenderungan untuk mempertahankan sifat kemagnetan bahan ferromagnetik terhadap perubahan medan magnet luar.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{1,6\text{maks}} \quad (3)$$

Dimana:

f = Frekuensi (Hz)

K_h = Konstanta histerisis

B_{maks} = Fluks maksimum (weber)

P_h = Rugi histerisis (watt)

- b. Rugi 'arus eddy' yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada besi inti. Besarnya rugi arus eddy adalah sebagai berikut:

$$P_e = K_e 2 \cdot f 2 \cdot B_{maks}^2 \quad (4)$$

Dimana:

f = Frekuensi (Hz)

B_{maks} = Fluks maksimum (weber)

P_e = Rugi arus eddy (watt)

K_e = Konstanta arus eddy, tergantung volume inti

Jadi, rugi besi (rugi inti) $P_i = P_h + P_e$

2.1.2 Regulasi Tegangan

Pengaturan tegangan (regulasi tegangan) suatu transformator adalah perubahan tegangan sekunder antara beban nol dan beban penuh pada suatu faktor kerja tertentu, dengan tegangan primer konstan.

$$R_{regulasi} = \frac{V_{sekunder(noload)} - V_{sekunder(fullload)}}{V_{sekunder(fullload)}} \times 100\% \quad (5)$$

2.1.3 Ketersediaan

Ketersediaan yang dimaksud adalah kesiapan suatu instalasi listrik dalam melayani kebutuhan konsumen. Dengan kata lain pemberian daya yang kontinyu untuk para konsumen adalah sangat penting. Sumber daya atau cadangan diperlukan untuk memberikan daya seluruh atau sebagian dari beban terpasang. Keluasan dari sistem listrik yaitu sistem listrik tersebut dapat diadakan perubahan jika diperlukan, diperbaharui, dan keperluan perluasan-perluasan lain dimasa mendatang. Dalam aspek ketersediaan ini yang terpenting dari suatu instalasi listrik adalah kontinuitas dalam mensuplai daya listrik kepada konsumen yang tidak mudah terganggu.

2.2 Perbandingan Konstruksi Transformator Tiga Belitan dengan Transformator Dua Belitan

Dilihat dari bentuk fisik transformator tiga belitan ini berbeda dengan transformator pada umumnya. Karena transformator ini memiliki dua belitan pada sisi *incoming*/belitan LV terdapat 6 buah masukan yang terdiri dari dua buah fasa untuk masing-masing R, S, dan T. Dua *incoming* tersebut masing-

masing dapat disuplai dengan dua generator yang berbeda, tetapi hanya memiliki 3 buah keluaran R, S, dan T.

2.2.1 Inti Besi

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh “*Eddy Current*”.

Perbedaan inti besi dari transformator tiga belitan dengan transformator dua belitan secara bentuk tidak berbeda tetapi secara luasan berbeda, lebih luas transformator tiga belitan karena digunakan untuk penampang dari tiga belitan, dua belitan LV dan satu belitan HV.

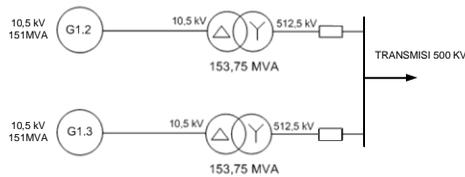
2.2.2 Belitan Transformator

Kumparan berfungsi untuk mentransformasikan besaran-besaran ukur tegangan listrik dari tingkat satu ke tingkat yang lain. Kumparan tersebut diisolasi terhadap inti maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat seperti karton, pertinax dan lain-lain.

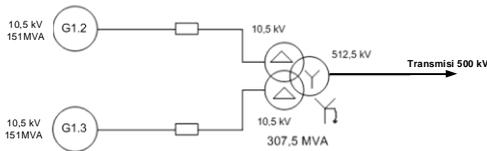
Pada transformator dua belitan terdapat kumparan primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan atau arus bolak-balik maka pada kumparan tersebut timbul fluksi yang menginduksikan tegangan, bila pada rangkaian sekunder ditutup maka akan mengalir arus pada kumparan ini. Jadi kumparan sebagai alat transformasi tegangan dan arus.

Pada transformator tiga belitan memiliki tiga belitan dimana terdiri dari dua buah belitan LV dan satu buah belitan HV. Transformator ini menggunakan tipe inti (*core type*), untuk mengurangi fluks bocor pada transformator. Keuntungan lain adalah mempunyai volume inti yang lebih kecil, sehingga diperoleh rugi besi yang lebih kecil dan konstruksi dari inti lebih sederhana.

3. METODE



Gambar 2. *Single Line* Transformator Dua belitan



Gambar 3. *Single Line* Transformator Tiga Belitan

Transformator dua belitan hanya memiliki satu belitan pada sisi *incoming*/belitan LV terdapat 3 buah masukan yang terdiri dari fasa R, S dan T. Satu *incoming* tersebut hanya dapat disuplai dengan satu generator.

Transformator tiga belitan ini memiliki dua belitan pada sisi *incoming*/belitan LV terdapat 6 buah masukan yang terdiri dari dua buah fasa untuk masing-masing R, S dan T. Dua *incoming* tersebut masing-masing dapat disuplai dengan dua generator yang berbeda, tetapi hanya memiliki 3 buah keluaran R, S dan T.

4. PEMBAHASAN DAN ANALISIS

Pada PLTGU Grati, telah dipasang satu buah transformator tiga belitan sebagai transformator *step-up* untuk dua generator 10,5 kV yang mensuplai jaringan transmisi 500 kV.

4.1. Rugi-Rugi dan Efisiensi Transformator

1. Transformator Dua Belitan:

- *Rated Power* : 153 750 kVA
- *No Load Losses* (Rugi Inti) : 108 000 W
- *Load losses* (75°C) : 470 000 W

- Rugi total : 578000 W
 - Frekuensi Nominal : 50 Hz
2. Transformator Tiga Belitan:
- *Rated Power* : 307 500 kVA
 - *No Load Losses* (Rugi Inti) : 161 000 W

Tabel 1. *Losses* pada Transformator Tiga Belitan (suhu 75° C)

Power (MVA)	Pair Off Winding	Load Losses (W)
153.75	HV/LV1	325 000
153.75	HV/LV2	445 000
307.5	HV/LV1+LV2	975 000
153.75	LV1/LV2	530 000

- Rugi total : HV/LV1 486 000 W
 HV/LV2 606 000 W
- Frekuensi Nominal: 50 Hz

Kemampuan satu buah transformator tiga belitan setara dengan dua buah transformator 2 belitan ditinjau dari daya yang dihasilkan, yaitu 307,5 MVA sama dengan 2 x 153,75 MVA.

Efisiensi transformator dua belitan pada beban penuh:

$$\eta_{FullLoad} = \frac{P_{out(no\,minal)}}{P_{out(no\,minal)} + P_{cu} + P_i} \times 100\%$$

$$\eta_{FullLoad} = \frac{153.750.000 \times 0.98}{(153.750.000 \times 0.98) + 578000} \times 100\% = 99,6\%$$

Efisiensi transformator tiga belitan pada beban penuh:

$$\eta_{FullLoad} = \frac{307.500.000 \times 0.98}{(307.500.000 \times 0.98) + 1092000} \times 100\% = 99,7\%$$

Data perhitungan di atas diperoleh dengan asumsi cos φ sistem = 0,98. Dari perhitungan efisiensi berdasarkan data teknis

yang dapat dilihat bahwa nilai efisiensi transformator tiga belitan lebih tinggi daripada transformator dua belitan.

4.2 Perhitungan Efisiensi Harian

Tabel 2. Pembebanan dan Efisiensi Transformator

Jam	Masukan Trafo			Teg Keluaran Trafo		Daya Keluaran Trafo		Efisiensi (%)	
	P (MW)	P (MW)	P (MW)	V (kV)	V (kV)	P (MW)	P (MW)	Trafo Dua Belitan	Trafo Tiga Belitan
	GT	GT	GT	GT	GT	GT	GT		
	1.1	1.2	1.3	1.1	1.2&1.3	1.1	1.2&1.3		
0.00	76.8	90.9	88.6	502.0	504.9	75.9	178.5	98.83	99.44
6.00	95.1	92.6	90.2	502.0	504.9	94.0	182.0	98.84	99.56
12.00	95.9	94.0	91.7	502.0	504.9	95.0	184.7	99.06	99.46
18.00	98.5	95.2	92.3	502.0	504.9	97.5	186.1	98.98	99.25
Efisiensi Rata-rata								98.91	99.37

Keterangan :

GT 1.1: Generator yang mensuplai transformator dua belitan.

GT 1.2 dan GT 1.3: Generator yang mensuplai transformator tiga belitan.

Dari hasil perhitungan efisiensi harian tersebut dapat diketahui bahwa untuk pembebanan sehari-hari transformator tiga belitan lebih tinggi dari pada transformator dua belitan, hal tersebut dapat diketahui dari lebih tingginya nilai efisiensi baik dilihat dari nilai rugi-rugi transformator maupun dilihat dari efisiensi rata-rata harian.

4.3 Regulasi Tegangan Transformator

1. Regulasi tegangan pada Transformator Tiga Belitan

Tabel 3. Regulasi Tegangan Transformator Tiga Belitan

Jam	Masukan Trafo				Keluaran Transformator Tiga Belitan		Regulasi Tegangan	
	GT 1.2		GT 1.3		V (kV)	MW	LV 1	LV 2
	V (kV)	MW	V (kV)	MW			%	%
0.00	10.38	90.9	10.35	88.6	504.9	178.5	0.04	0.03
6.00	10.41	92.6	10.38	90.2	504.9	182	0.04	0.04
12.00	10.41	94	10.46	91.7	504.9	184.7	0.04	0.04
18.00	10.44	95.2	10.45	92.3	504.9	186.1	0.04	0.05
Regulasi Tegangan Rata-Rata Harian							0.04	0.04

Dari data perhitungan regulasi didapat regulasi tertinggi yang terjadi adalah 0,04 % untuk belitan LV 1 dan 0,05 % untuk belitan LV 2 rata-rata dalam satu hari. Sehingga tegangan yang disuplai oleh generator GT1.2 dan GT1.3 kepada transformator tiga belitan masih dalam *range* yang diijinkan (+5 % dan -10%) .

2. Regulasi Tegangan pada Transformator Dua Belitan

Tabel 4. Regulasi Tegangan Transformator Dua Belitan

Jam	Masukan Trafo		Keluaran Transformator Dua Belitan		Regulasi Tegangan %
	GT 1.1		V (kV)	MW	
	V (kV)	MW			
0	10.43	76.8	502	75.9	0.04
6	10.43	95.1	502	94.00	0.04
12	10.45	95.9	502	95.00	0.04
18	10.47	98.5	502	97.50	0.05
Regulasi Tegangan Rata-Rata Harian					0.04

Dari data perhitungan regulasi di atas didapat regulasi tertinggi yang terjadi adalah 0,05 % rata-rata dalam satu hari. Sehingga tegangan yang disuplai oleh generator GT1.1 kepada transformator dua belitan masih dalam *range* yang diijinkan (+5 % dan -10%).

4.4 Aliran Arus Beban

Menganalisa aliran arus dilakukan dengan cara membandingkan transformator dua belitan dan transformator tiga belitan ketika keduanya dibebani dengan beban atau daya yang sama.

1. Beban dengan daya yang sama pada kedua transformator.

Tabel 5. Data Masukan dan Keluaran Transformator pada Daya Beban Sama

	Masukan Trafo						Keluaran Trafo					
	GT 1.1			GT 1.2			GT 1.3			V (kV)	A (kA)	MW
	V (kV)	A (kA)	MW	V (kV)	A (kA)	MW	V (kV)	A (kA)	MW			
Trafo 2 Belitan	10.4	4.33	77							502.	88.2	75.9
Trafo 3 Belitan				10.05	2.33	41.2	10.10	2.26	39.0	504.9	94.40	79.3

Pada transformator dua belitan ketika dibebani 75,9 MW inputnya 4,33 kA, sedangkan pada transformator tiga belitan ketika dibebani hampir sama, yaitu 79,3 MW arus yang mengalir pada sisi *incoming* terbagi rata antara belitan LV1 dan Belitan LV2 yaitu 2,33 kA dan 2,26 kA karena daya terbagi rata antara belitan LV 1 = 41,2 MW dan LV 2 = 39,0 MW.

2. Aliran arus beban pada saat GT1.1, GT1.2, dan GT1.3 beroperasi pada daya yang sama.

Tabel 6. Data Masukan dan Keluaran Transformator pada Daya Generator yang Sama

	Masukan Trafo									Keluaran Trafo		
	GT 1.1			GT 1.2			GT 1.3			V (kV)	A (kA)	M W
	V (kV)	A (kA)	MW	V (kV)	A (kA)	M W	V (kV)	A (kA)	M W			
Trafo 2 Belitan	10.4	5.40	95.9							502.0	112.02	95.0
Trafo 3 Belitan				10.4	5.35	95.3	10.48	5.27	93.3	504.9	215.6	186.7

Daya output GT1.1 = 95,9 MW; GT1.2 = 95,3 MW; GT1.3 = 93,3 MW dan arus input transformator dua belitan 5,40 kA, dan arus input transformator tiga belitan 5,35 kA dan 5,27 kA.

Ketika masing-masing generator mengeluarkan daya yang sama maka arus yang mengalir pada masing-masing belitan LV pada transformator tiga belitan dan transformator dua belitan relatif sama besar.

3. Aliran arus beban pada saat salah satu input transformator tiga belitan *OFF*.

Tabel 7. Pembebanan pada saat Transformator Tiga Belitan

Masukan Trafo						Keluaran Transformator Tiga Belitan		
GT 1.2			GT 1.3			V (kV)	A (kA)	MW
V (kV)	A (kA)	MW	V (kV)	A (kA)	MW			
10.41	5.31	93.1	GT 1.3 OFF			504.9	106.32	92.0
40.38	5.3	92.3				504.9	106.50	91.2
GT 1.2 OFF			10.46	5.30	93.0	504.9	107.80	92.0
			10.48	5.30	94.0	504.9	118.40	93.1
10.38	5.17	90.9	10.35	5.02	88.6	504.9	208	178.5
10.41	5.28	92.6	10.38	5.06	90.2	504.9	210.5	182

Dari data tabel dapat dilihat bahwa ketika salah satu belitan LV transformator tidak mendapat suplai, transformator masih

dapat beroperasi. Masukan transformator yang lain tidak terganggu atau dapat mengalirkan arus yang sama dengan daya yang sama pula. Ini membuktikan bahwa belitan LV1 dan belitan LV2 tidak saling mempengaruhi. LV1 dapat bekerja dengan baik dengan atau tanpa bekerjanya belitan LV2 begitu juga sebaliknya. Tapi jika LV1 dan LV2 bekerja bersama-sama maka daya yang ditransformasikan adalah jumlah dari daya yang melalui kedua belitan.

Oleh karena itu bila ditinjau dari sisi kinerja operasi transformator tiga belitan, meskipun transformator mempunyai 2 buah input tetapi bila salah satu gas turbin tidak beroperasi (OFF) karena ada kerusakan atau untuk keperluan pemeliharaan, transformator tetap dapat beroperasi dengan hanya satu buah masukan.

5. PENUTUP

Dari hasil pembahasan dan analisis yang dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Karena pentingnya suatu ketersediaan atau kontinuitas energi listrik yang mensuplai ke beban, maka pemasangan dua buah transformator dua belitan sebagai transformator step-up pada dua generator lebih baik dari pada bila dipasang satu buah transformator tiga belitan.
- 2) Transformator tiga belitan lebih unggul dalam hal kemudahan, dan ekonomis yang merupakan faktor pendukung dari faktor ketersediaan energi listrik. Faktor ketersediaan energi sangatlah penting ini dinilai berdasarkan dampak-dampak yang timbul jika faktor ketersediaan diabaikan seperti pemadaman yang timbul karena kurangnya suplai energi listrik, ketidakstabilan sistem jika tiba-tiba salah satu pembangkit lepas dari jaringan karena ada gangguan pada transformator step-up pada generatornya.
- 3) Kelemahan dari transformator tiga belitan sebagai transformator step-up pada dua generator adalah jika terjadi gangguan pada transformator yang menyebabkan tripnya PMT maka dua generator tidak dapat mensuplai daya ke beban. Hal ini tidak terjadi jika menggunakan dua transformator untuk transformator step-up pada dua generator karena jika terjadi

kerusakan pada salah satu transformator maka masih ada salah satu generator yang dapat mensuplai daya ke beban.

6. DAFTAR PUSTAKA

Fitzgerald A.F, 1997, *Mesin-Mesin Listrik*, Erlangga.

Gecalsthom, 1990, *Protective Relay Application Guide*,
Manchester : ICA Advertising & Marketing.

Generator Step-up Transformer TRUM 8257 N 408 071

Grati CCP 800 MW Contract Drawing generator Step-up
Transformer TRUM 8557 N 408 071.

Guru & Hiziroghu, *Electrical Machinery & Transformer*, Oxford