

ANALISA KONEKSI PLTA WONOGIRI PADA SISTEM GI WONOGIRI JTM 20 KV DENGAN SOFTWARE ETAP 7.0.

Hasta Nurullita^{*)}, Karnoto, and Susatyo Handoko

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: hastanurullita@yahoo.co.id

Abstrak

Gardu Induk (GI) Wonogiri 150 kV melalui Trafo I berkapasitas 30 MVA dan PLTA Wonogiri 15,5 MVA menyuplai daya listrik ke beban penyulang WNI 3, WNI 4, WNI 6 dan WNI 8. Pengoperasian PLTA Wonogiri tergantung jumlah debit air yang ada pada Waduk Gajah Mungkur. Saat PLTA Wonogiri beroperasi atau terkoneksi ke sistem GI Wonogiri akan menyebabkan daya reaktif (kVAR) di GI Wonogiri melonjak tinggi, rata-rata pada tahun 2012 sekitar 293.794.785 kVAR dan rata-rata faktor daya ($\cos \phi$) rendah, yaitu 0,7 ($\cos \phi$ threshold 0,9). Sehingga, PT PLN (Persero) Area Surakarta mengalami kerugian sebesar 1.007.312 kVARh atau sebesar Rp 518.785.400,00 per bulannya. Aliran daya kedua sistem, saat GI Wonogiri terkoneksi dan tidak terkoneksi ke PLTA Wonogiri, disimulasikan menggunakan software ETAP 7.0.0. Kemudian kedua hasil simulasi tersebut dibandingkan dan dianalisa untuk mengetahui penyebab nilai kVAR yang melebihi nilai kVAR threshold. Hasil pengujian menunjukkan bahwa saat sistem GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri, $\cos \phi$ yang terukur di Trafo I GI Wonogiri sebesar 0,942 ($\cos \phi$ threshold 0,9), sehingga tidak mengalami kelebihan kVAR. Sedangkan saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri, nilai $\cos \phi$ terukur sebesar 0,735 sehingga mengalami kelebihan kVAR sebesar 1,701 kVAR. Dan, tegangan generator kurang maksimal sekitar 92,3 %, yaitu bernilai 6,09 kV dari 6,60 kV. Semakin tinggi tegangan generator PLTA, maka $\cos \phi$ yang titik pengukurannya di Trafo I GI Wonogiri juga semakin tinggi, yaitu 0,991 pada tegangan generator 98 %, 99 %, dan 100 %.

Kata kunci : daya reaktif, faktor daya, Gardu Induk, PLTA, Software ETAP 7.0.0

Abstract

Wonogiri Substation 150 kV system pass through Transformer I with a capacity of 30 MVA and Wonogiri Hydropower 15,5 MVA supply to the load feeders WNI 3, WNI 4, WNI 6 and WNI 8. Wonogiri Hydropower operation depends on the amount of water present in the Gajah Mungkur Dam. When Wonogiri Hydropower operated or connected to the Wonogiri Substation system will cause reactive power (kVAR) in Wonogiri Substation soaring, in 2012 averaging approximately 293.794.785 kVAR and the average power factor ($\cos \phi$) is low, i.e. 0,7 ($\cos \phi$ threshold 0,9). Thus, PT PLN (Persero) Area Surakarta lost 1.007.312 kVARh, paying charge Rp 518.785.400,00 per month. Load flow both systems, while Wonogiri Substation connected and not connected to the Wonogiri Hydropower, simulated using ETAP software 7.0.0. Then both the simulation results are compared and analyzed to determine the cause of the kVAR value in excess kVAR threshold value. The test results show that when the Wonogiri Substation system is not connected to Wonogiri Hydropower, $\cos \phi$ which measured in Transformers I of Wonogiri Substation is 0,942 ($\cos \phi$ threshold 0,9), so it does not have kVAR charge. While Wonogiri Substation system connected to Wonogiri Hydropower, $\cos \phi$ values measured at 0,735 so that it has a charge 1.701 kVAR. And, the generator voltage operated less than maximum about 92,3%, the value 6,09 kV of 6,60 kV. Higher the hydropower generator voltage, the $\cos \phi$ which a point measurement in Transformers I of Wonogiri Substation also higher, i.e. 0,992 at voltage generator is 98 %, 99 %, and 100%.

Keywords : reactive power, power factor, substation, hydropower, ETAP 7.0.0 Software.

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang Masalah

Dewasa ini, kebutuhan energi listrik terus mengalami peningkatan tiap tahunnya. Hal ini terjadi seiring dengan meningkatnya kebutuhan taraf hidup masyarakat. PT PLN (Persero) sebagai pihak penyedia dan pengelola

energi listrik.berupaya untuk memenuhi peningkatan kebutuhan listrik masyarakat.

Rayon Wonogiri yang termasuk PT PLN (Persero) Area Surakarta bekerja sama dengan PT Indonesia Power mengoptimalkan potensi Waduk Serbaguna Gajah Mungkur Wonogiri. Tujuan ini merupakan upaya PLN menambah pasokan daya listrik untuk memenuhi kebutuhan listrik di Rayon Wonogiri.

Rayon Wonogiri memiliki Gardu Induk (GI) 150 kV Wonogiri yang mampu menyuplai sembilan penyulang yang dikelompokkan menjadi dua trafo, yaitu Trafo I berkapasitas 30 MVA dan Trafo II berkapasitas 60 MVA. GI Wonogiri melalui Trafo I berkapasitas 30 MVA dan PLTA Wonogiri 15,5 MVA menyuplai daya listrik ke empat beban penyulang, yaitu WNI 3, WNI 4, WNI 6 dan WNI 8.

Pengoperasian PLTA Wonogiri bergantung pada jumlah debit air waduk yang ada. Saat PLTA Wonogiri beroperasi atau terkoneksi ke GI Wonogiri akan menyebabkan daya reaktif (kVAR) di GI Wonogiri melonjak tinggi, rata-rata pada tahun 2012 sekitar 293.794.785 kVAR dan rata-rata faktor daya ($\cos \phi$) rendah, yaitu 0,7 ($\cos \phi$ threshold 0,9). Pada bulan April 2012, *Standmeter* GI Wonogiri Trafo I terbaca nilai kVAR terukur sebesar 2.531.400 kVARh, dengan nilai kVARh *threshold* sebesar 1.524.104 kVARh. Sehingga pada bulan April 2012, PT PLN (Persero) Area Surakarta mengalami kerugian tagihan *penalty* kelebihan kVARh sebesar 1.007.296 kVARh atau Rp 503.648.000,00.

Kasus kelebihan kVARh tidak hanya berlangsung pada bulan April 2012. Jika dirata-rata dari bulan Januari sampai Juni 2012, PT PLN (Persero) Area Surakarta mengalami kerugian kVARh sebesar 1.007.312 kVARh atau sebesar Rp 518.785.400,00 per bulannya.

Pada penelitian penelitian, aliran daya kedua sistem terkoneksi dan tidak terkoneksi PLTA ini disimulasikan menggunakan *software ETAP 7.0.0*. Kemudian kedua hasil simulasi tersebut dibandingkan dan dianalisa untuk mengetahui penyebab nilai kVAR yang melebihi nilai kVAR *threshold*.

1.2 Tujuan

1. Menganalisa daya reaktif (kVAR) dan faktor daya ($\cos \phi$) saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri dengan *software ETAP 7.0.0*.
2. Menganalisa daya reaktif (kVAR) dan faktor daya ($\cos \phi$) saat sistem GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri dengan *software ETAP 7.0.0*.
3. Membandingkan dua kondisi sistem, yaitu sistem GI terkoneksi dan tidak terkoneksi dengan PLTA.
4. Menganalisa penyebab kelebihan kVAR yang titik pengukuran *Standmeter* di Trafo I 30 MVA GI

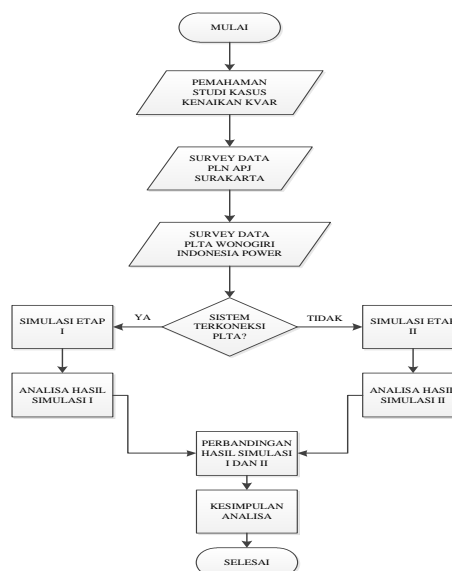
Wonogiri 150 kV saat terkoneksi ke PLTA Wonogiri dengan *software ETAP 7.0.0*.

1.3 Batasan Masalah

1. Data energi listrik yang digunakan adalah data perusahaan listrik PT. PLN (Persero) Area Surakarta dan PT Indonesia Power UBP Mrica - Sub Unit PLTA Wonogiri Tahun 2012.
2. Data yang digunakan adalah data *sampling* dan bukan data *real time*.
3. Tidak membahas beban penyulang distribusi secara detail, hanya melihat total beban tiap penyulang.
4. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah ETAP 7.0.0 , studi analisa aliran daya untuk menganalisa nilai kVAR dan faktor daya.
5. Menggunakan metode perhitungan aliran daya *Newton Raphson* pada *Software ETAP 7.0.0*.
6. Tidak membahas komponen PLTA Wonogiri secara mendetail.
7. Tidak membahas sistem eksitasi generator.

2 Metode

Secara garis besar penyusunan Penelitian ini digambarkan melalui Diagram Alir (*Flowchart*) berikut ini :



Gambar 1. Diagram alir penyusunan penelitian

2.1 Metode Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini pengumpulan data dilakukan dari *survey* data pada obyek penelitian, yaitu PT. PLN (Persero) Area Surakarta dan Sub Unit PLTA Wonogiri PT Indonesia Power UBP Mrica.

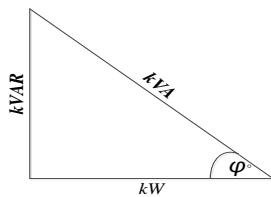
2.2 Metode Pengolahan Data

Data-data yang diolah adalah data-data yang diambil dari PT. PLN (Persero) Area Surakarta dan Sub Unit PLTA Wonogiri PT Indonesia Power UBP Mrica. Setelah data – data diperoleh, langkah selanjutnya adalah melakukan pengolahan data. Pengolahan disini dilakukan dengan dua langkah, pertama pada sistem yang tersuplai PLTA, kedua pada sistem yang tidak tersuplai PLTA.

Langkah-langkah untuk menghitung kelebihan daya reaktif atau charge kVAR adalah sebagai berikut :

- Perhitungan kW dan kVAR terukur untuk mencari nilai $\cos \phi$ terukur
- Pemisahan kVAR terukur untuk $\cos \phi$ di bawah $\cos \phi$ threshold
- Perhitungan nilai kVAR pada $\cos \phi$ threshold
- Pengurangan kVAR terukur dengan kVAR threshold

Perhitungan charge kVAR ini berdasarkan Teori Segitiga Daya yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3 berikut :

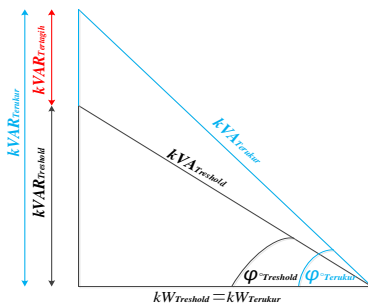


Gambar 2. Segitiga daya

Dari Gambar 2 di atas, dapat diperoleh

$$\tan \theta = \frac{kVAR}{kW} \quad (1)$$

$$\cos \theta = \frac{kW}{\sqrt{kW^2 + kVAR^2}} \quad (2)$$



Gambar 3. Segitiga daya perhitungan kelebihan kVAR

Dari Gambar 3 di atas, dapat diperoleh

$$\begin{aligned} \tan \phi_{\text{Terukur}} &= \frac{kVAR_{\text{Terukur}}}{kW_{\text{Terukur}}}, \text{ atau} \\ kVAR_{\text{terukur}} &= kW_{\text{terukur}} \times \tan \phi_{\text{terukur}} \\ \tan \phi_{\text{Threshold}} &= \frac{kVAR_{\text{Threshold}}}{kW_{\text{Terukur}}}, \text{ atau} \\ kVAR_{\text{Threshold}} &= kW_{\text{Terukur}} \times \tan \phi_{\text{Threshold}} \end{aligned} \quad (3)$$

Berdasarkan SPLN No. 01727/532/DDPKP/2005, ditetapkan $\cos \phi$ threshold batas ambang sebesar 0,9. Maka didapat :

$$\cos \phi_{\text{Threshold}} = 0,9 \quad (4)$$

$$\text{Sehingga, } \phi = \cos^{-1} 0,9 = 0,451 \text{ rad} \quad (5)$$

$$\text{Maka, } \tan \phi = \tan 0,451 \text{ rad} = 0,484 \quad (6)$$

Sehingga diperoleh,

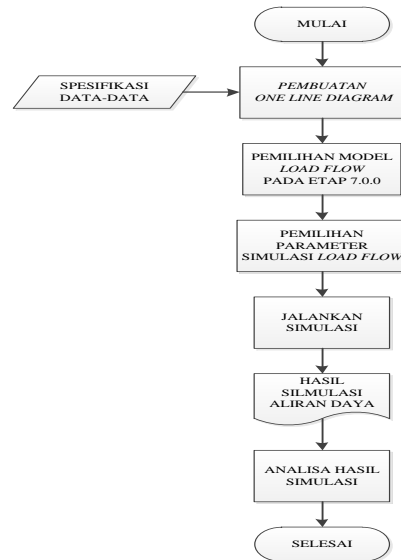
$$kVAR_{\text{Threshold}} = kW_{\text{Terukur}} \times 0,484 \quad (7)$$

Pada akhirnya diperoleh charge kVAR atau kelebihan kVAR atau kVAR tertagih sebagai berikut :

$$kVAR_{\text{terttagih}} = kVAR_{\text{Terukur}} - (kW_{\text{Terukur}} \times 0,484)$$

$$kVAR_{\text{terttagih}} = kVAR_{\text{terukur}} - kVAR_{\text{Threshold}} \quad (8)$$

Pada software ETAP 7.0.0 juga menerapkan Metode Newton Raphson untuk simulasi studi aliran daya, dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4. Diagram alir simulasi aliran daya menggunakan ETAP 7.0.0

Kemudian kedua hasil simulasi tersebut dianalisa dan dibandingkan sehingga untuk mengetahui penyebab kenaikan nilai kVAR tersebut.

2.3 Data – Data Sistem

2.3.1 Data Kondisi Eksisting Rayon Wonogiri^[7]

Data jaringan tegangan menengah Rayon Wonogiri yang digunakan dalam penelitian ini adalah data eksisting jaringan tegangan menengah Rayon Wonogiri pada tahun 2012.

2.3.1.1 Data Trafo Gardu Induk (GI) Wonogiri

Di Rayon Wonogiri terdapat Gardu Induk Wonogiri yang memiliki 2 trafo. Trafo I yang berkapasitas 30 MVA

digunakan untuk mendistribusikan energi listrik di penyulang WNI 3, WNI 4, WNI 5, WNI 6, dan WNI 8, sedangkan Trafo II yang memiliki kapasitas 60 MVA dipergunakan untuk menyuplai penyulang WNI 1, WNI 7, WNI 9, dan WNI 10. Dari tabel 1, pada dasarnya GI Wonogiri memiliki 10 penyulang. Hanya saja penyulang WNI 2 pada GI Wonogiri hanya berfungsi sebagai *express feeder* yang menghubungkan GI dengan PLTA Wonogiri.

Tabel 1. Kapasitas Gardu Induk di Rayon Wonogiri

Gardu Induk	Trafo	Kapasitas Trafo	Ratio Tegangan (kV)	Jumlah Penyulang
GI Wonogiri	I	30 MVA	150/20	4
	II	60 MVA	150/20	5

Sumber : PT PLN (Persero) Area Surakarta

Tabel 2. Beban Trafo GI Wonogiri saat terkoneksi PLTA Wonogiri 12 April 2012 Jam 10:00

LOKASI GI	TRAFO TERPASANG (MVA)			RATIO TEGANGAN (KV)		ARUS NOMINAL (A)		JAM 10:00							
								ARUS BEBAN (A)			BEBAN		TEGANGAN		
								LV			MW	MVAR		20 KV	
								R	S	T					
WONOGIRI	I	1	X	30	150	/	20	115	866	328	281	303	10	3,6	20,2
	II	1	X	60	150	/	20	231	1.732	505	539	535	17,7	5,4	20,3

Sumber : PT PLN (Persero) Area Surakarta

2.3.1.2 Data Pembebanan Gardu Induk (GI) di Rayon Wonogiri

Data gardu induk yang dimaksud disini adalah data pembebanan pada masing-masing penyulang pada GI Wonogiri. Di mana pengambilan dan data tersebut dilakukan melalui *monitoring SCADA* PT PLN (Persero) Area Surakarta pada Tanggal 12 April 2012 jam 10.00 WIB.

Tabel 3. Beban MW Penyulang GI Wonogiri saat terkoneksi PLTA Wonogiri 12 April 2012 Jam 10.00

Feeder	Iavg (kA)	V _{L-L} (kV)	MWtotal	MVAtotal	COS PHI	MVARtotal
WNL08	3,667	20,121	0,133	0,142	0,936	0,051
WNL02	142,000	20,111	4,943	4,951	0,998	0,239
WNL03	96,333	20,120	3,142	3,351	0,935	1,188
WNL04	124,000	20,161	4,109	4,375	0,940	1,493
WNL06	78,000	20,164	2,604	2,752	0,954	0,817
WNL07	120,600	20,267	4,176	4,224	0,988	0,384
WNL01	128,920	20,273	4,200	4,512	0,931	1,608
WNL09	120,783	20,273	4,800	5,064	0,946	1,584
WNL10	141,920	20,267	4,608	4,968	0,929	1,776

Sumber : PT PLN (Persero) Area Surakarta

Tabel 4. Beban Arus Penyulang GI Wonogiri saat terkoneksi PLTA Wonogiri 12 April 2012

GARDU INDUK	TRAFO	FEEDER	DATA PENYULANG									BEBAN RATA-RATA											
			JAM 10:00			MAX			AVE			JAM 19:00			MAX			AVE			MAX		
			R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T
WONOGIRI	I	WNL08	8	0	3	8	4	20	0	10	20	10	20	20	10	20	20	10	20	20	10	20	20
		WNL02	171	82	173	173	142	173	81	172	173	142	173	173	142	173	173	142	173	173	142	173	173
		WNL03	101	100	88	101	96	205	188	160	205	184	205	205	184	205	205	184	205	205	184	205	205
		WNL04	128	119	125	128	124	185	176	172	185	178	185	185	178	185	185	178	185	185	178	185	185
		WNL06	88	60	86	88	78	81	58	93	93	77	93	93	77	93	93	77	93	93	77	93	93
	II	WNL07	113	120	129	129	121	254	274	291	291	273	291	291	273	291	291	273	291	291	273	291	291
		WNL01	126	119	141	141	129	271	285	298	298	285	298	298	285	298	298	285	298	298	285	298	298
		WNL09	125	160	149	160	145	281	322	329	329	311	329	329	311	329	329	311	329	329	311	329	329
		WNL10	145	161	119	161	142	320	333	262	333	305	333	333	305	333	333	305	333	333	305	333	333

Sumber : PT PLN (Persero) Area Surakarta

2.3.2 Data PLTA Wonogiri^[8]

3.3.2.1 Data Generator

PLTA Wonogiri memiliki 2 unit generator, dengan data teknis generator sebagai berikut :

- Daya Output : 7.750 kVA
- Phasa : 3 phasa
- Tegangan : 6.600 V
- Arus Armature : 678 Ampere
- Frekuensi : 50 Hz
- Pole (Kutub) : 22 Buah (11 pasang)
- Rating Kecepatan : 273 rpm
- Faktor daya : 0,8 *Lagging*
- Tegangan Eksitasi : 220 V
- Arus Medan : 256 A

3.3.2.2 Data Trafo

- Cooling : ONAN
- Frekuensi : 50 Hz
- Fasa : 3 Fasa
- kVA : 15500
- Tegangan Sekunder : 22000 Volt
- Tegangan Primer : 6600 Volt

3.3.2.3 Data Pengoperasian PLTA

Pada Tanggal 12 April 2012 generator unit 2 PLTA Wonogiri beroperasi , sedangkan unit 1 tidak beroperasi karena dalam proses *maintenance*.

Tabel 5 Data laporan operasi PLTA Wonogiri 12 April 2012

INDONESIA PLN HARI LAPORAN OPERASI JAM 24.00 WIB TANGGAL UBPMRICA - SUB UNIT PLTA WONOGIRI									
Hari: Kamis Tanggal: 12 April 2012									
JAM	KONDISI MESIN					PRODUKSI KWH			KETERANGAN
	MW	MW	JUMLAH	MVar	Teg	UNIT1	UNIT 2	PS	
01.00		6,2	6,2	0,3	21,0		6.000	37	Unit : 1#
02.00		6,2	6,2	0,5	21,0		6.000	35	Unit : 2//
03.00		6,2	6,2	0,2	21,0		6.000	30	
04.00		6,2	6,2	0,5	21,0		6.100	48	
05.00		6,2	6,2	0,6	20,9		6.200	30	
06.00		6,2	6,2	0,6	20,3		6.000	23	
07.00		6,2	6,2	0,5	21,0		6.100	27	
08.00		6,2	6,2	0,7	20,5		6.100	39	
09.00		6,2	6,2	0,4	20,5		6.000	43	
10.00		6,2	6,2	0,5	20,6		6.000	39	
11.00		6,2	6,2	0,5	21,0		6.200	37	

Sumber : PT Indonesia Power UBPMrica – Sub Unit PLTA Wonogiri

2.3.3 Data Jaringan Express Feeder

Tabel 6. Data jaringan penyalang WNI 2 (express feeder)

Spesifikasi Express Feeder	
Jenis Penghantar	AAAC
Luas Penampang mm ²	3 X 240 mm ²
Panjang Jaringan	10,46 kms

Sumber : PT PLN (Persero) Area Surakarta

2.3.4 Data Impedansi Kabel Jaringan

Tabel 7. Data impedansi kabel jaringan

mm ²	AAAC			
	Z1, Z2		Zo	
	R1	jx1	Ro	jxo
1	6,0000	7,0000	8,0000	9,0000
16	2,0161	0,4036	2,1641	1,6911
25	0,9217	0,3790	1,0697	1,6695
50	0,6452	0,3678	0,7932	1,6553
70	0,4608	0,3572	0,6088	1,6447
95	0,3396	0,3449	0,4876	1,6324
120	0,2688	0,3375	0,4168	1,6251
150	0,2162	0,3305	0,3631	1,6180
185	0,1744	0,3239	0,3224	1,6114
240	0,1344	0,3158	0,2824	1,6003

Sumber : SPLN 72-3:1983

2.3.5 Data Tarif Transaksi

Tabel 8. Pembacaan dan pencatatan Stand meter transaksi tenaga listrik periode transaksi 1 April 2012 jam 10:00 s/d 1 Mei 2012 jam 10:00

GARDU INDUK	TTTIK UKUR		ENERGI KWH				KVARH
			WBP	LWBP1	LWBP2	TOTAL	
WONOGIRI	TRF	#1	860.800	857.940	1.582.200	3.300.940	1.007.296

Sumber : PT PLN (Persero) Area Surakarta

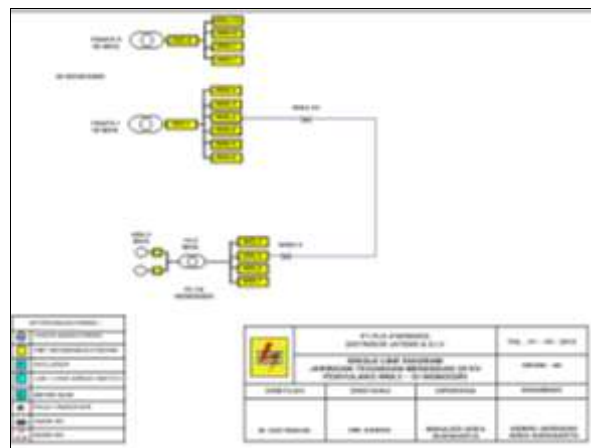
3. Hasil dan Analisa

3.1 Simulasi Sistem dengan Software ETAP 7.0.0

Simulasi sistem yang dilakukan terdiri dari dua macam, yaitu Simulasi I dan Simulasi II. Simulasi I adalah kondisi saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri. Sedangkan, Simulasi II adalah saat kondisi sistem GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri. Data yang digunakan berupa data *sampling* dari kondisi saat sistem terkoneksi PLTA dan bukan data *real time*, yaitu pada tanggal 12 April 2012 jam 10.00 WIB.

3.1.1 Penggambaran One Line Diagram

Penggambaran *One Line Diagram* ke dalam ETAP 7.0.0 berdasarkan pada Gambar 5, yaitu dari sistem 150 kV masuk ke Gardu Induk Wonogiri JTM 20 kV. Kapasitas trafo dibagi menjadi dua, yaitu Trafo I berkapasitas 30 MVA dan Trafo II berkapasitas 60 MVA. Penyalang WNI 2 pada GI Wonogiri yang terhubung dengan WG 3 pada PLTA Wonogiri adalah *express feeder*.



Sumber : PT PLN (Persero) Area Surakarta

Gambar 5. Single line diagram JTM 20 kV Penyalang WNI 2 GI Wonogiri tahun 2012

Dari data beban trafo dan beban penyalang pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 mengenai data pembebanan GI Wonogiri pada tanggal 12 April 2012 jam 10.00 WIB. Data pembebanan GI Wonogiri ini dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Data pembebanan GI Wonogiri

Gardu Induk	Trafo	DATA INCOMING					DATA PENYULANG						
		Tegangan		Arus (A)	MVAR	MW	Feeder	Iavg (kA)	V _{lc} (kV)	MWtotal	MVAtotal	COS PHI	MVARtotal
		150 kV	20 kV										
Wonogiri	I	154	20,2	304,0	3,6	10,0	WNL08	3,667	20,121	0,133	0,142	0,936	0,051
							WNL02	142,000	20,111	4,943	4,951	0,998	0,239
							WNL03	96,333	20,120	3,142	3,351	0,935	1,188
							WNL04	124,000	20,161	4,109	4,375	0,940	1,493
							WNL06	78,000	20,164	2,604	2,752	0,954	0,817
	II	154	20,3	526,3	5,4	17,7	WNL07	120,600	20,267	4,176	4,224	0,988	0,384
							WNL01	128,920	20,273	4,200	4,512	0,931	1,608
							WNL09	120,783	20,273	4,800	5,064	0,946	1,584
							WNL10	141,920	20,267	4,608	4,968	0,929	1,776

Pada PLTA Wonogiri memiliki 2 unit generator. Namun, pada saat tanggal 12 April 2012 generator yang beroperasi hanya generator unit 2. Unit 1 sedang dalam perawatan (*maintenance*).

Generator dapat dioperasikan sebagai suatu sistem kontrol tegangan (diregulasi), yang berarti bahwa generator akan menyesuaikan kVAR *output* untuk mengontrol tegangan. Oleh karena itu, besarnya tegangan terminal, operasi daya aktif (MW), dan catu daya reaktif minimum dan maksimum (Q Max dan Min Q) harus dimasukkan ke generator (*power grid*) kontrol tegangan. Berikut data yang diperoleh dan diinputkan bagian generator pada *software* ETAP 7.0.0



Gambar 6. Editor generator sinkron pada *software* ETAP 7.0.0

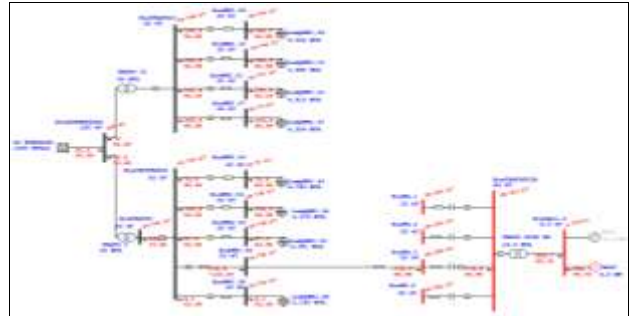
Untuk data operasi PLTA Wonogiri dapat dilihat pada Tabel 5. Dengan data-data yang sudah diperoleh dan diolah sebelumnya maka dapat digambarkan *One Line Diagram* pada *software* ETAP sebagai berikut



Gambar 7. *One line diagram* dengan ETAP 7.0.0 saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri

3.1.2 Running Simulasi dengan ETAP 7.0.0

Dalam penelitian ini, analisa yang dipergunakan adalah *Balanced Load Flow Analysis*. *Balanced Load Flow Analysis* adalah metode yang sangat sesuai dengan simulasi pada pengujian ini. Karena, pengiriman energi listrik dari PLTA Wonogiri adalah melalui *express feeder* jaringan tiga fasa antara WG 3 dan WNI 2 dan berikut adalah hasil simulasi *Load Flow* ETAP 7.0.0.



Gambar 8. Hasil simulasi *Load Flow* saat GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri

3.2 Evaluasi dan Analisa Sistem

3.2.1 Pembahasan Hasil Simulasi

Hasil simulasi aliran daya saat GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri dapat dilihat pada Gambar 9 .

LOAD FLOW REPORT

Bus ID	Voltage		Generation		Load		Load Flow						
	kV	%Mag	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF	
* BusGen1.2	6,600	92,270	4,4	6,200	0,501	0	0	0	BusTRAFOPLTA	6,200	0,501	589,7	99,7
* BusGIWONOGIRI	150,000	100,000	0,0	21,475	10,040	0	0	0	BusTRAF0I	3,882	3,675	20,6	72,6
									BusTRAF0II	17,593	6,365	72,0	94,0
BusINCTRAFOI	20,000	98,729	-0,7	0	0	0	0	0	BusWNL02	-6,050	0,055	176,9	100,0
									BusWNL03	3,111	1,179	97,3	93,5
									BusWNL04	4,081	1,478	126,9	94,0
									BusWNL06	2,604	0,818	79,8	95,4
									BusWNL08	0,132	0,050	4,1	93,6
									BusTRAF0I	-3,878	-3,580	154,3	73,5
BusTRAF0I	20,000	98,729	-0,7	0	0	0	0	0	BusGIWONOGIRI	-3,878	-3,580	154,3	73,5
									BusINCTRAFOI	3,878	3,580	154,3	73,5
BusTRAFOPLTA	22,000	91,869	2,3	0	0	0	0	0	BusWG.1	0,000	0,000	0,0	0,0
									BusWG.2	0,000	0,000	0,0	0,0
									BusWG.4	0,000	0,000	0,0	0,0
									BusWG.3	6,187	0,267	176,9	99,9
									BusGen1.2	-6,187	-0,267	176,9	99,9

Gambar 9. Hasil simulasi *Load Flow Report* Saat GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri

Dari hasil simulasi *Load Flow Report* pada *BusIncTRAF0I* atau letak dari *Standmeter* GI Wonogiri Trafo I dapat dilihat bahwa nilai *Cos φ* sebesar 74,5 % atau 0,745. Hasil ini menunjukkan bahwa *Cos φ* pada GI Wonogiri Trafo I buruk karena jika dibandingkan dengan *Cos φ Threshold* sebesar 0,9 (SPLN No. 01727/532/DDPKP/2005), maka nilainya lebih rendah.

Pada GI Wonogiri Trafo I nilai beban terukur sebesar $3,878\text{MW} = 3.878\text{ kW}$, dan $3,576\text{ MVAR} = 3.576\text{ kVAR}$, maka berdasarkan persamaan 17 dapat dihitung :

$$\begin{aligned} \text{kVAR}_{\text{Threshold}} &= \text{kW}_{\text{Terukur}} \times 0,484 \\ &= 3.878 \times 0,484 = 1.878,201\text{ kVAR} \end{aligned}$$

Maka, dengan persamaan 18 dapat dihitung kelebihan kVAR dari $\text{kVAR}_{\text{Threshold}}$, yaitu sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{kVAR}_{\text{Tertagih}} &= \text{kVAR}_{\text{Terukur}} - \text{kVAR}_{\text{Threshold}} \\ &= 3.576,000 - 1.878,201 \\ &= 1.701,779\text{ kVAR} \end{aligned}$$

Dengan demikian berdasarkan hasil simulasi pada sistem saat GI Wonogiri terkoneksi dengan PLTA Wonogiri, PT PLN (Persero) Area Surakarta mengalami kelebihan kVAR sebesar $1.701,779\text{ kVAR}$. Dengan kata lain, PT PLN (Persero) Area Surakarta harus membayar sebesar $\text{kVAR}_{\text{Tertagih}}$ kepada PT PLN (Persero) P3B APP Salatiga BC Surakarta selaku pengatur tarif transaksi energi se-Jawa dan Bali.

Critical Report

Device ID	Type	Condition	Rating/Limit	Unit	Operating	% Operating	Phase Type
BusGen1,2	Bus	Under Voltage	6,600	kV	6,090	92,3	3-Phase
BusTRAFOPLTA	Bus	Under Voltage	22,000	kV	20,211	91,9	3-Phase
BusWG.1	Bus	Under Voltage	22,000	kV	20,211	91,9	3-Phase
BusWG.2	Bus	Under Voltage	22,000	kV	20,211	91,9	3-Phase
BusWG.3	Bus	Under Voltage	22,000	kV	20,202	91,8	3-Phase
BusWG.4	Bus	Under Voltage	22,000	kV	20,211	91,9	3-Phase
Gen2	Generator	Overload	6,200	MW	6,200	100,0	3-Phase

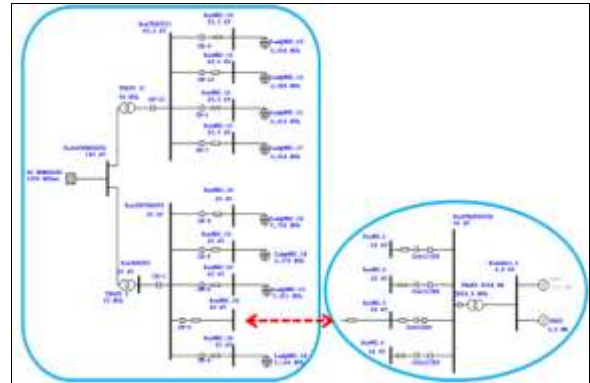
Gambar 10. Critical Report saat GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri

Dari Gambar 10 pada sistem saat GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri terlihat bahwa tegangan operasi bus Trafo PLTA Wonogiri sebesar 20,211 kV lebih rendah dari tegangan ratingnya yaitu 22 kV. Dapat disimpulkan bahwa bus Trafo PLTA Wonogiri hanya beroperasi 91,9% dari tegangan ratingnya. Hal yang sama juga terjadi pada bus feeder WG 1, WG 2, WG 3, dan WG 4 bahwa tegangan operasi masing-masing bus sebesar 91,9%, yaitu kurang maksimal atau kurang dari 100 %. Hal ini dikarenakan tegangan operasi pada bus generator pun juga kurang maksimal, yaitu 6,090 kV atau sekitar 92,3 %.

3.2.2 Simulasi Saat Sistem GI Wonogiri Tidak Terkoneksi PLTA Wonogiri

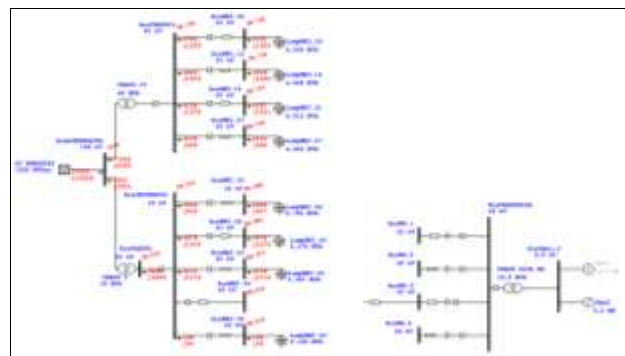
Pengujian saat sistem GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri juga menggunakan simulasi aliran daya pada software ETAP 7.0.0. Data yang digunakan pada simulasi ini adalah data yang sama pada saat kondisi GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri, yaitu data yang diambil pada tanggal 12 April 2012 jam 10.00 WIB.

Penggambaran *One Line Diagram* sistem saat GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri sama dengan sistem saat GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri, hanya saja jaringan *express feeder* diputus. Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa PLTA Wonogiri sedang tidak beroperasi sehingga tidak menyuplai daya ke GI Wonogiri, dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 One Line Diagram dengan ETAP 7.0.0 saat sistem GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri

Metode untuk menganalisa aliran daya simulasi ETAP 7.0.0 saat sistem GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri ini masih sama dengan yang digunakan pada saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri, yaitu menggunakan *Balanced Load Flow Analysis*. Pada Gambar 12 dan 13 dapat dilihat hasil *running* program dan *load flow report* nya.



Gambar 12 Hasil simulasi Load Flow Saat GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri

LOAD FLOW REPORT

Bus ID	Voltage			Generation				Load				Load Flow			
	kV	%Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF			
* BusGWONOGIRI	150,000	100,000	0,0	27,533	10,268	0	0	BusTRAF01	9,940	3,903	41,1	93,1			
								BusTRAF02	17,593	6,365	72,0	94,0			
BusINCTRAFOI	20,000	98,614	-1,9	0	0	0	0	BusWNI02	0,000	0,000	0,0	0,0			
								BusWNI03	3,110	1,178	97,4	93,5			
								BusWNI04	4,079	1,478	127,0	94,0			
								BusWNI06	2,603	0,818	79,9	95,4			
								BusWNI08	0,132	0,050	4,1	93,6			
								BusTRAF01	-9,924	-3,523	308,3	94,2			
BusTRAF01	20,000	98,614	-1,9	0	0	0	0	BusGWONOGIRI	-9,924	-3,523	308,3	94,2			
								BusINCTRAFOI	9,924	3,523	308,3	94,2			
BusTRAF02	20,000	98,791	-1,9	0	0	0	0	BusWNI01	4,159	1,634	130,6	93,1			
								BusWNI07	4,133	0,649	122,2	98,8			
								BusWNI09	4,743	1,629	146,5	94,6			
								BusWNI10	4,540	1,812	142,8	92,9			
								BusGWONOGIRI	-17,574	-5,724	540,1	95,1			
BusWNI01	20,000	98,736	-1,9	0	0	4,157	1,631	BusTRAF02	-4,157	-1,631	130,6	93,1			
BusWNI02	20,000	98,614	-1,9	0	0	0	0	BusINCTRAFOI	0,000	0,000	0,0	0,0			
BusWNI03	20,000	98,574	-1,9	0	0	3,109	1,176	BusINCTRAFOI	-3,109	-1,176	97,4	93,5			

Gambar 13 Hasil Simulasi Load Flow Report Saat GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri

Dari Gambar 13 hasil simulasi pada BusINCTRAFOI dapat dilihat bahwa nilai $\cos \phi$ sebesar 94,2 % atau 0,942. Hasil ini menunjukkan bahwa $\cos \phi$ pada GI Wonogiri Trafo I baik karena jika dibandingkan dengan batas ambang $\cos \phi_{Threshold}$ yang berdasarkan SPLN No. 01727/532/DDPKP/2005 sebesar 0,9. Dan juga bila dibandingkan saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA, $\cos \phi$ saat sistem GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA bernilai lebih baik.

Pada GI Wonogiri Trafo I nilai beban terukur sebesar $9,924 \text{ MW} = 9,924 \text{ kW}$ dan $3,523 \text{ MVAR} = 3,523 \text{ kVAR}$, maka berdasarkan persamaan 17 dapat dihitung :

$$kVAR_{Threshold} = kW_{Terukur} \times 0,484 = 9,924 \times 0,484 = 4.803,216 \text{ kVAR}$$

Dengan perhitungan di atas dan berdasarkan hasil simulasi saat sistem GI Wonogiri tidak terkoneksi dengan PLTA Wonogiri, nilai beban yang terukur sebesar 9.924 kW dan 3.523 kVAR, sedangkan batas ambang kVAR $threshold$ sebesar 4.803,216 kVAR. Dengan demikian, PT PLN (Persero) Area Surakarta tidak mengalami kelebihan kVAR karena nilai kVAR yang terukur dibawah nilai kVAR $threshold$.

3.2.3 Simulasi Variasi Tegangan Generator

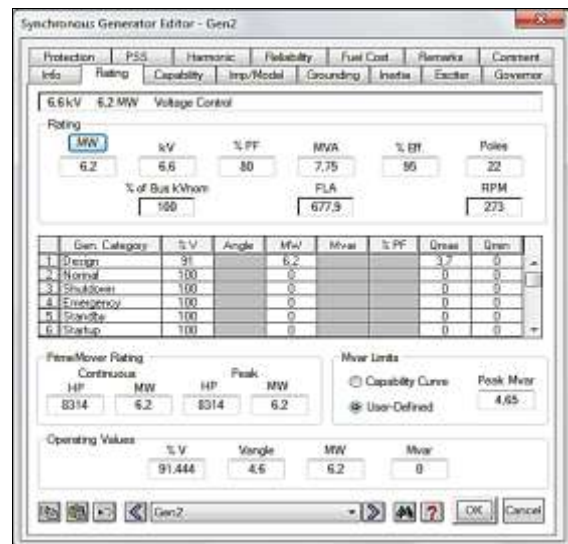
Simulasi variasi tegangan generator adalah simulasi saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri dengan mengatur variasi tegangan operasi generator. Setting besarnya tegangan bus diatur di terminal generator sinkron sebagai persentase dari kV bus nominal.

Tegangan operasi % ini digunakan sebagai nilai kontrol (yang diatur) untuk mode kontrol tegangan.

Pada saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri yang sudah disimulasikan sebelumnya, tegangan operasi generator kurang maksimal, yaitu sebesar 6,090 kV dari 6,600 kV atau hanya sekitar 92,3%, dapat dilihat pada Gambar 11. Pada simulasi sistem variasi setting tegangan generator dengan batas kemampuan generator MVAR Max Q sebesar 3,7 MVAR dan Min Q sebesar 0 MVAR, dapat disimulasikan dengan variasi tegangan 91 % - 100 %.

3.2.3.1 Tegangan Generator 91 %

Berikut adalah hasil simulasi dari variasi tegangan generator sebesar 91 %



Gambar 14 Editor generator sinkron saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA dengan tegangan generator 94 %

Bus ID	Voltage			Generation				Load				Load Flow			
	kV	%Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF			
BusGen1.2	6,600	91,444	4,6	6,200	0,000	0	0	BusTRAF0PLTA	6,200	0,000	593,1	100,0			
BusTRAF01	20,000	98,556	-0,7	0	0	0	0	BusGWONOGIRI	-3,873	-4,085	164,9	68,8			
								BusINCTRAFOI	3,873	4,085	164,9	68,8			

Gambar 15 Hasil Simulasi Load Flow Report saat GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri dengan tegangan generator 94 %

Dari hasil simulasi Load Flow Report tegangan generator 91 %, pada BusINCTRAFOI GI Wonogiri Trafo I dapat dilihat bahwa nilai $\cos \phi$ sebesar 69,7 % atau 0,697. Hasil ini menunjukkan bahwa $\cos \phi$ pada GI Wonogiri Trafo I buruk karena jika dibandingkan dengan $\cos \phi_{Threshold}$ yang berdasarkan SPLN No. 01727/532/DDPKP/2005 sebesar 0,9 maka nilainya lebih rendah.

Pada GI Wonogiri Trafo I nilai beban terukur sebesar $3,873 \text{ MW} = 3.873 \text{ kW}$, dan $4,085 \text{ MVAR} = 4.085 \text{ kVAR}$, maka berdasarkan persamaan 17 dapat dihitung :

$$kVAR_{Threshold} = kW_{Terukur} \times 0,484 = 3.873 \times 0,484 = 1.875,780 \text{ kVAR}$$

Maka, dengan persamaan 18 dapat dihitung kelebihan kVAR dari $kVAR_{Threshold}$, yaitu sebagai berikut

$$kVAR_{Tertagih} = kVAR_{Terukur} - kVAR_{Threshold} = 4.085,000 - 1.875,780 = 2.209,220 \text{ kVAR}$$

Dengan demikian berdasarkan hasil simulasi pada sistem saat GI Wonogiri terkoneksi dengan PLTA Wonogiri, PT PLN (Persero) Area Surakarta mengalami kelebihan kVAR sebesar $2.209,220 \text{ kVAR}$. Dengan kata lain untuk tegangan generator sebesar 91 % ini, PT PLN (Persero) Area Surakarta harus membayar sebesar $kVAR_{Tertagih}$ kepada PT PLN (Persero) P3B APP Salatiga BC Surakarta selaku pengatur tarif transaksi energi se-Jawa dan Bali.

3.2.3.2 Perbandingan Hasil Simulasi Variasi Setting Tegangan Generator

Dengan cara yang sama dari perhitungan dan simulasi pada setting tegangan generator 91 %, maka perbandingan hasil simulasi pengaturan tegangan generator dengan variasi sebesar 91 % sampai dengan 100 % dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Perbandingan hasil simulasi variasi tegangan generator

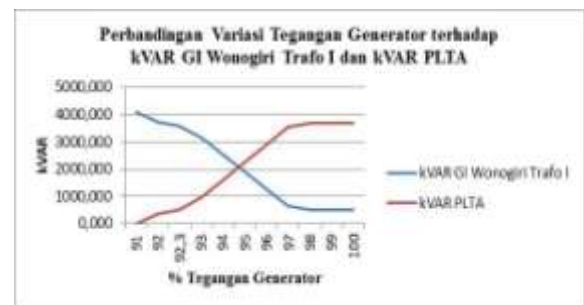
SETTING TEGANGAN GENERATOR (%)	PLTA			GIWONOGIRITRAFO I			THRESHOLD PLN		KVAR TERTAGIH	KVARH TERTAGIH
	KV	COS PHI	KVAR	COS PHI	KW	KVAR	COS PHI	KVAR		
91	6,035	100,0%	0	68,80%	3873	4085,000	0,9	1875,780	2209,220	1104,610
92	6,072	99,9%	336	71,90%	3876	3745,000	0,9	1877,232	1867,768	933,884
92,3	6,090	99,7%	501	73,50%	3878	3580,000	1,9	1878,201	1701,799	850,899
93	6,035	98,8%	952	77,80%	3884	3132,000	0,9	1881,107	1250,893	625,446
94	6,204	96,0%	1582	84,00%	3895	2515,000	0,9	1886,435	628,565	314,283
95	6,270	94,1%	2225	90,00%	3909	1896,000	0,9	1893,215	2,785	1,392
96	6,336	90,7%	2882	95,10%	3999	1274,000	0,9	1936,804	0,000	0,000
97	6,402	86,8%	3553	98,70%	3946	650,000	0,9	1911,135	0,000	0,000
98	6,416	85,9%	3700	99,20%	3951	514,000	0,9	1913,557	0,000	0,000
99	6,416	85,9%	3700	99,20%	3951	514,000	0,9	1913,557	0,000	0,000
100	6,416	85,9%	3700	99,20%	3951	514,000	0,9	1913,557	0,000	0,000

Dari Tabel 4.3 di atas, maka dapat digambarkan grafik sebagai berikut



Gambar 4.16 Grafik perbandingan variasi % tegangan generator terhadap $\text{Cos } \phi$ PLTA dan $\text{Cos } \phi$ GI Wonogiri Trafo I

Dari grafik Gambar 4.16 di atas dapat dilihat bahwa dengan semakin tinggi tegangan generator maka $\text{Cos } \phi$ pada GI Wonogiri Trafo I juga semakin maksimal mendekati 1, yaitu 0,992 atau 99,20 %. Dimana $\text{Cos } \phi$ pada GI Wonogiri Trafo I ini dikatakan baik saat tegangan generator 98 %, 99 %, dan 100 % karena jika dibandingkan dengan batas ambang $\text{Cos } \phi_{Threshold}$ sebesar 0,9 maka nilainya lebih tinggi. Sedangkan saat tegangan generator 94 %, 95 %, 97 %, dan 96 % $\text{Cos } \phi$ pada GI Wonogiri Trafo I ini dapat dikatakan buruk karena nilainya di bawah batas ambang $\text{Cos } \phi_{Threshold}$. Dengan tegangan generator yang semakin maksimal (100 %), nilai $\text{Cos } \phi$ pada PLTA Wonogiri turun hingga 85,9 %. Namun, hal ini tidak terlalu berpengaruh signifikan karena masih di atas $\text{Rating } \text{Cos } \phi$ pada PLTA yang sebesar 80 %. Pada setting tegangan 95 %, $\text{Cos } \phi$ pada Trafo I GI Wonogiri dan $\text{Cos } \phi$ pada PLTA Wonogiri sama-sama menunjukkan hasil yang baik di atas 0,9 yaitu 0,9 dan 0,941. Dan, Pada setting tegangan 96 %, $\text{Cos } \phi$ pada Trafo I GI Wonogiri dan $\text{Cos } \phi$ pada PLTA Wonogiri sama-sama menunjukkan hasil yang baik di atas 0,9 yaitu 0,951 dan 0,9. Dengan demikian, pada setting tegangan generator 95 % dan 96 % merupakan range yang aman untuk pengoperasian sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri.



Gambar 4.17 Grafik perbandingan variasi % tegangan generator terhadap kVAR PLTA dan kVAR GI Wonogiri Trafo I

Dari grafik Gambar 4.17 di atas dapat dilihat bahwa dengan semakin maksimal setting tegangan maka kVAR pada GI Wonogiri Trafo I cenderung menurun hingga 514 kVAR. Sedangkan dengan setting tegangan yang semakin maksimal (100 %), nilai $\text{Cos } \phi$ pada PLTA

Wonogiri cenderung naik dari batas limit daya reaktif minimum generator sebesar nol hingga batas limit daya reaktif minimum generator sebesar 3700 kVAR.



Gambar 4.18 Grafik perbandingan variasi % tegangan generator terhadap kVAR tertagih

Dari grafik Gambar 4.18 di atas dapat dilihat bahwa dengan semakin tinggi tegangan generator maka $kVAR_{\text{tertagih}}$ pada GI Wonogiri Trafo I menurun. Pada saat tegangan generator 91 % hingga 95 %, GI Wonogiri Trafo I masih mengalami kelebihan kVAR, tetapi cenderung menurun. Sedangkan dengan *setting* tegangan yang semakin tinggi (95 % sampai dengan 100 %), GI Wonogiri Trafo I tidak mengalami kelebihan kVAR karena nilai kVAR terukur masih dibawah batas ambang kVAR *threshold* masing-masing. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tegangan generator yang kurang maksimal dapat menyebabkan kelebihan kVAR.

4 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Pada simulasi saat sistem GI Wonogiri terkoneksi PLTA Wonogiri, nilai $\cos \phi$ terukur sebesar 0,735 ($\cos \phi$ *threshold* 0,9) sehingga mengalami kelebihan kVAR sebesar 1,701 kVAR.
2. Pada simulasi saat sistem GI Wonogiri tidak terkoneksi PLTA Wonogiri, nilai $\cos \phi$ terukur sebesar 0,942 ($\cos \phi$ *threshold* 0,9) sehingga tidak mengalami kelebihan kVAR
3. Penyebab kelebihan kVAR pada beban penyulang Trafo I 30 MVA GI Wonogiri 150 kV saat kondisi terkoneksi PLTA Wonogiri tegangan generator yang kurang maksimal sekitar 92,3 %, yaitu bernilai 6,090 kV dari 6,600 kV.
4. Berdasarkan tabel 4.3 semakin tinggi *setting* tegangan generator, maka $\cos \phi$ yang titik pengukurannya di Trafo I GI Wonogiri juga semakin tinggi, yaitu 0,992 pada tegangan generator 98%, 99%, dan 100 %

Referensi

- [1]. Arismunandar, A. dan S. Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik Jilid I Pembangkitan dengan Tenaga Air*. Jakarta : Pradnya Paramita, 2000.
- [2]. Gulliver, John. S and Roger E. A. Arndt, *Hydropower Engineering Handbook*, McGraw-Hill Inc., United States, 1991.
- [3]. Kurniawan, Hafiz, *Studi Pembangunan PLTA Skala Piko Pada Saluran Irigasi Untuk Memenuhi Kebutuhan Listrik Rumah Tangga Di Jorong Tanjung Langsek Kec. Lintau Buo Utara Kab. Tanah Datar*, Universitas Sumatera Utara, Medan, 2011.
- [4]. Marsudi, Djiteng, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, Balai Penerbit dan HUMAS ISTN, Jakarta, 1990.
- [5]. Nahvi, Mahmood and Joseph. A. Edminister, *Schaum's Outlines Teori dan Soal-soal Rangkaian Listrik Edisi Keempat*, Erlangga, Jakarta, 2004.
- [6]. PT. PLN (Persero) P3B Jawa Bali, *Pelatihan Operator Gardu Induk : Teori Dasar Listrik*, PT. PLN (Persero), Ungaran.
- [7]. PT. PLN (Persero), *Profil PT. PLN (Persero) Area Surakarta*, PT. PLN (Persero), Surakarta, 2012.
- [8]. PT. Indonesia Power, *Profil Sub Unit PLTA Wonogiri PT. Indonesia Power UBP Mrica*, PT. Indonesia Power, Wonogiri, 2012.
- [9]. Ramdhani, Mohamad, *Rangkaian Listrik*, Erlangga, Jakarta, 2008.
- [10]. Saadat, Hadi, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc., Singapura, 1999.
- [11]. Sawai, Wilhelmina S. Y. M., *Studi Aliran Daya Sistem Jawa-Bal 500 kV Tahun 2007-2011*, Tesis S-2, Universitas Indonesia, Depok, 2007.
- [12]. Stevenson, William D., *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, Erlangga, Jakarta, 1996.
- [13]. Sulasno, *Teknik dan Sistem Distribusi Tenaga Listrik Edisi 1*, Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang, 2001.
- [14]. Sulasno, *Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi 2*, Badan Penerbit Uniersitas Diponegoro, Semarang, 2001