Analisis Rugi-rugi Daya Listrik Akibat Ketidak Seimbangan Tegangan Penyulang Pada Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar

Hendry Sularto

Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura
Jl. Ahmad Yani, Pontianak – 78124

Abstract– *Unbalanced Voltage supply is case which is impossible to be avoided and inflict losses on. Unbalanced voltage is depended on line voltage unbalanced factor. Raising unbalanced factor will increase power losses and decrease efficiency of the three-phase induction motor. According to experiment result in laboratory, the increasing power loses is 58,47% and decreasing eficiency is 14,14% if motor operating in 5,0% unbalanced voltage factor, while theoretically computation results in the increasing of power losses is 241,79% and decreasing efficiency is 31,34%*

Keywords– *Unbalanced voltage, Motor, Losses*

1. Pendahuluan

Didalam bidang industri untuk mempertahankan ongkos produksi yang minimum dan harga produksi yang dapat bersaing, diperlukan meminimkan penyerapan energi listrik pada semua tingkatan, dari proses pabrik termasuk pengendalian motor motor listrik. Salah satu ukuran dari konservasi energi dalam pengendalian motor-motor listrik adalah perbaikan dari kualitas daya, dimana tegangan penyulang yang tidak seimbang merupakan masalah penting lainnya dari kualitas daya.

2. Faktor Tegangan Tak Seimbang

Definisi NEMA

$$LVUF\ (\%) = \frac{Besaran\ tegangan\ maksimum\ dari\ deviasi\ dengan\ teg.rata-rata\ x\ 100\%}{Besaran\ (magnitude) Teg.rata-rata}$$

$$LVUF\ (\%) = \frac{Max[|V_{ab} - V_{avg}|, |V_{bc} - V_{avg}|, |V_{ca} - V_{avg}|] \times 100\%}{|V_{avg}|}$$

LVUF = Faktor tegangan antara fasa tak seimbang
$|V_{avg}|$ = Besaran tegangan rata-rata
$|V_{ab} - V_{avg}|$ = Besaran deviasi antara V_{ab} dengan V_{avg}
$|V_{bc} - V_{avg}|$ = Besaran deviasi antara V_{bc} dengan V_{avg}
$|V_{ca} - V_{avg}|$ = Besaran deviasi antara V_{ca} dengan V_{avg}

3. Rugi Rugi Daya Pada Motor Induksi

Analisis steady state (keadaan tunak) dari operasi motor induksi dengan penyulang tak seimbang digunakan pendekatan komponen simetris.
Disini diperlukan pengembangan rangkaian ekivalen menjadi rangkaian ekivalen urutan positif dan negative. Bila V_a, V_b, dan V_c adalah tegangan fasa penyulang dari motor, maka hubungan dengan tegangan komponen urutan nol, positif dan negative (V_o, V_p, dan V_n) diberikan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} Vo \\ Vp \\ Vn \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$$

Analisis dari rangkaian diberikan

$$Z_i = R_s + JX_s + \frac{(JX_m)\left(\frac{R_r}{S_i} + JX_r\right)}{\frac{R_r}{S_i} + J(X_m + X_r)}$$

Untuk impedansi urutan positif, i = p dan Sp = S, sedangkan impedansi urutan negatif, i = n dan Sn = 2 - s
Arus urutan positif dan negatif stator dan rotor adalah :

$I_{ps} = \frac{Vp}{2p}$

$I_{pr} = I_{ps} \frac{J X_m}{\frac{R_r}{s} + J(X_m + X_r)}$

$I_{ns} = \frac{V_n}{Z_n}$

$I_{nr} = I_{ps} \frac{J X_m}{\frac{R_r}{2-s} + J(X_m + X_r)}$

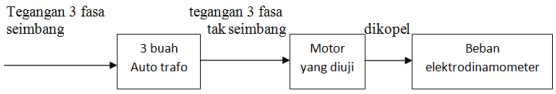
Motor dihubungkan star tanpa pembumian maka
$I_{as} = I_{ps} + I_{ns}$
$I_{bs} = a^2 I_{ps} + a I_{ns}$
$I_{cs} = a I_{ps} + a^2 I_{ns}$
Untuk rotor juga dapat ditransformasi seperti stator :
$I_{ar} = I_{pr} + I_{nr}$
$I_{br} = a^2 I_{pr} + a I_{nr}$
$I_{cr} = a I_{pr} + a^2 I_{nr}$
Dengan memperoleh arus stator dan rotor per fasa, maka rugi rugi daya stator dan rotor dapat dihitung dengan :
Rugi rugi tembaga stator (P_{cus}) = ($I_{as}^2 + I_{bs}^2 + I_{cs}^2$) R_s
Rugi rugi tembaga rotor (P_{cur}) = ($I_{ar}^2 + I_{br}^2 + I_{cr}^2$) R_r
Dari pengujian beban nol diperoleh rugi rugi daya beban nol (P_{nl}) jadi total rugi rugi daya pada motor induksi (P_r) adalah :
$P_r = P_{cus} + P_{cur} + P_{nl}$
Efisiensi (η) dapat diperoleh dari rumus :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{P_o}{P_o + P_r}$$

Po = Daya aktif Output
Pin = Daya aktif Input

4. Hasil dan Pembahasan

Pengujian dilakukan di laboratorium Teknik kendali Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura dan motor yang diuji adalah motor induksi tiga fasa tipe rotor sangkar. Mula-mula motor dioperasikan dengan tegangan nominal tiga fasa seimbang, dengan auto transformer, tegangan input(penyulang) diatur menjadi tegangan tiga fasa tak seimbang dan sampai mencapai factor tegangan antara fasa tak seimbang (RVUF)=5%



Gambar 1. Rangkaian Pengujian

Parameter motor induksi rotor sangkar adalah sebagai berikut :

Rs = 66,46 ohm
Xs = 52,59 ohm
Xm = 560,47 ohm
Rr = 25,66 ohm
Xr = 35,56 ohm

Tabel 1 Faktor tegangan antar fasa tak seimbang(LVUF)

No	V_a	V_b	V_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_{avg}	V_{ab}-V_{avg}	V_{bc}-V_{avg}	V_{ca}-V_{avg}	LVUF
1	220	220	220	381.05	381.05	381.05	381.05	0	0	0	0
2	220	220	217	381.05	378.46	378.46	379.32	1.73	-0.86	-0.86	0.46
3	210	220	215	372.42	376.73	368.07	372.41	0.01	4.32	-4.34	1.17
4	220	220	210	381.05	372.42	372.42	375.30	5.75	-2.88	-2.88	1.53
5	210	205	195	359.41	346.45	350.82	352.23	7.18	-5.78	-1.41	2.04
6	210	200	190	355.11	337.79	346.55	346.48	8.63	-8.69	0.07	2.51
7	220	220	200	381.05	363.87	363.87	369.60	11.45	-5.73	-5.73	3.10
8	220	200	195	363.87	342.09	359.62	355.19	8.68	-13.10	4.43	3.69
9	220	200	190	363.87	337.79	355.39	352.35	11.52	-14.56	3.04	4.13
10	210	190	180	346.55	320.47	338.08	335.03	11.52	-14.56	3.05	4.35
11	220	200	180	363.87	329.24	346.99	346.70	17.17	-17.46	0.29	5.04

Tabel 2 Data pengujian motor induksi rotor sangkar

No	LVUF	I_a	I_b	I_c	P_{in}	T	n
	[%]	[Ampere]			[w]	[N.m]	[Rpm]
1	0,0	1,05	1,04	1,05	488	2,52	1404
2	0,5	1,06	1,03	1,03	488	2,47	1400
3	1,2	1,05	1,02	1,02	488	2,44	1398
4	1,5	1,04	1	1,00	488	2,38	1394
5	2,0	1,05	1,03	1,02	488	2,35	1375
6	2,5	1,05	1,06	1,01	488	2,30	1373
7	3,1	1,07	1,02	1,01	488	2,34	1390
8	3,7	1,06	0,96	1,01	488	2,28	1377
9	4,1	1,04	1	1,00	488	2,18	1377
10	4,4	1,06	1,02	1,02	488	2,17	1359
11	5,0	1,06	1,04	1,01	488	2,11	1363

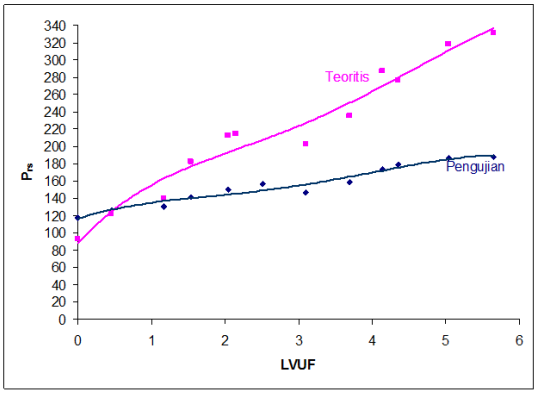
Tabel 3 Perhitungan Po, Pr_s dan η dari pengujian

No	LUVF	P_{in}	T	n	P_o	P_{rs}	η_{rb}
	[%]	[w]	[N.m]	[Rpm]	[w]	[w]	[%]
1	0	488	2,52	1404	370	118	75,82
2	0,46	488	2,47	1400	362	126	74,18
3	1,17	488	2,44	1398	357	131	73,16
4	1,53	488	2,38	1394	347	141	71,11
5	2,04	488	2,35	1375	338	150	69,26
6	2,51	488	2,30	1373	331	157	67,83
7	3,09	488	2,34	1390	341	147	69,88
8	3,69	488	2,28	1377	329	159	67,42
9	4,13	488	2,18	1377	314	174	64,34
10	4,35	488	2,17	1359	309	179	63,32
11	5,03	488	2,11	1363	301	187	61,68

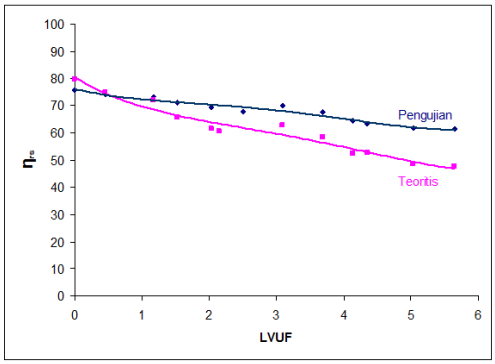
Pr_s = rugi rugi daya motor induksi tipe rotor sangkar
η_{rs}= efisiensi motor induksi tipe rotor sangkar

Tabel 4. Perhitungan rugi rugi daya dan efisiensi motor induksi rotor sangkar secara teoritis

No	LVUF	P_{cus} (W)	P_{cur} (W)	P_{NL} (W)	P_{rs} (W)	P_o (W)	η_{rs} (%)
1	0.0	61.64	14.64	17	93.28	370	79.87
2	0.5	82.95	22.23	17	122.18	362	74.77
3	1.2	95.03	27.25	17	139.28	357	71.94
4	1.5	126.33	36.69	17	182.02	347	65.59
5	2.0	136.95	58.61	17	212.56	338	61.39
6	2.5	149.41	48.45	17	214.86	331	60.64
7	3.1	141.70	44.11	17	202.81	341	62.71
8	3.7	165.09	52.80	17	234.89	329	58.34
9	4.1	201.63	66.11	17	287.47	314	52.21
10	4.4	193.65	65.30	17	275.95	309	52.83
11	5.0	226.85	74.97	17	318.82	301	48.53



Gambar 2. Perbandingan rugi-rugi daya motor induksi rotor sangkar antara pengujian dan teoristis



Gambar 3. Perbandingan efisiensi motor induksi rotor sangkar antara pengujian dengan teoritis

Pada tegangan tak seimbang akan terjadi tegangan urutan negatif yang menimbulkan torka pengereman pada motor, maka pada tabel 3 diperoleh rugi rugi daya semakin membesar dan efisiensi semakin mengecil bila factor ketidak seimbang dinaikkan, kecuali baris ke 7. Hal ini disebabkan keterbatasan peralatan, kestabilan tegangan PLN dan penentuan tegangan input untuk menentukan LVUF, Tegangan tegangan yang digunakan dalam penulisan ini merupakan salah satu dari sekian permutasi.

Dari gambar 2 dan 3 terlihat pada LVUF < 1% kurva pengujian lebih besar dari kurva teoritis. Hal ini disebabkan mula mula motor masih dingin, parameter motor belum terpengaruh temperatur, tetapi sesudah temperatur motor meningkat, pada LVUF > 1 % kurva

pengujian lebih kecil dari kurva teoritis. Pada analisis teoritis diasumsi kondisi ideal, di mana parameter konstan karena efisiensi berbanding terbalik dengan rugi rugi daya maka yang terjadi pada efisiensi adalah kebalikan dari rugi rugi daya, hal ini terlihat pada gambar 2.

Baik kurva pengujian maupun teoritis menunjukkan bahwa dengan kenaikan ketidak seimbangan akan mngakibatkan rugi rugi daya listrik meningkat dan efisiensi menurun (tabel 3 dan 4).

Rugi rugi daya pada tegangan seimbang (LVUF = 0) pada pengujian laboratorium 118 watt dan perhitungan teoritis 93,28 watt, sedangkan penyulang dengan LVUF = 5% pada pengujian 187 watt berarti terjadi peningkatan 58,47% terhadap penyulang seimbang, perhitungannya adalah (187 – 118) / 118 x 100 % = 58,47 % dan teoritis 318,82 watt atau peningkatan 241,79 %. Efisiensi pada tegangan seimbang (LVUF = 0) pada pengujian laboratorium 75,82 % dan perhitungan teoritis 78,87 %, sedangkan penyulang dengan LVUF 5 % pada pengujian 61,68 % atau penurunan 14,14 % dan teoritis 48,53 % atau penurunan 31,34 %. Mengoperasikan motor dengan rugi rugi daya yang besar atau efisiensi yang rendah tidak diinginkan karena akan terjadi kenaikan temperatur sehingga merusak motor dan pemborosan biaya pemakaian. Oleh karena itu standard NEMA membatasi faktor ketidak seimbangan (LVUF) yang melebihi 5 % karena akan menimbulkan kenaikan temperature sebesar 50 % dan mengakibatkan pengurangan daya mekanik (derated motor).

5. Kesimpulan

1. Peningkatan factor ketidak seimbangan tegangan penyulang akan mempebesar rugi rugi daya dan menurunkan efisiensi motor (tabel 3 dan 4)
2. Pada LVUF > 1 % kurva pengujian rugi rugi daya lebih besar dari kurva teoritis (gambar 2 dan 3), sebaliknya kurva pengujian efisiensi lebih kecil dari kurva teoritis
3. Menurut pengujian di laboratorium, peningkatan rugi rugi daya dan penurunan efisiensi pada motor induksi rotor sangkar pada LVUF 5 % adalah 58,47 % dan 14,14 %.
4. Menurut perhitungan teoritis, peningkatan rugi rugi daya dan penurunan efisiensi pada motor induki tipe rotor sangkar pada LVUF 5 % adalah 241,79 % dan 31,31 %
5. Perbedaan hasil pengujian dan teoritis (gambar 2 dan 3) karena teoritis diasumsikan kondisi motor ideal (tidak dipengaruh kenaikan temperatur), keterbatasan dari peralatan yang digunakan dan kestabilan dari tegangan PLN.

Referensi

[1]. Alexander S Laugsdarf, MME, Dsc, *" Theory of Alternating Current Machinery"*, Second edition, Tata Mc Graw Hill, New Delhi 1978.

[2]. charles I, Huberk PE, *"Electric Machines Theory, Operation, Application, Adjusyment and Control"* Second Edition, Newjersey 2009 Prantice Hall.

[3]. Nema Std, Motor and Generator Part 14.36, *"Effect of Unbalanced Voltage on Performance of Polyphase Induction Motor"*, Publication MG I – 1998 (Revision 3, 2002).

[4]. Knwarjit Singh Sandhu, Vincent Chandhary, *" Steady State of Induction Motor Operating with Unbalanced Supply Sistem"*, WSEA Trans on Circuit and System, Vol 8, February 2009.

Biography

Hendry Sularto lahir di Pontianak pada tanggal 21 Februari 1949. Menyelesaikan program Strata I (S I) tahun 1984 dan Strata II (S 2) tahun 2010 di Universitas Tanjungpura Pontianak Jurusan Teknik elektro, Sejak tahun 1984 sampai sekarang mengajar di Fakultas Teknik Jurusan Teknik elektro Universitas Tanjungpura**.**