

Perbandingan Unjuk Kerja Motor Reluktan Sinkron dan Motor Sinkron

Bambang Sugiyantoro, F. Danang Wijaya, Fajar Wijayanto

Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (telp: 0274-552305; fax: 0274-552306)

Abstract—One of the commonly used electric machines in industry is synchronous motor. Synchronous motor has advantages over other types of motors, which are having a relatively constant speed on changing load, and the power factor can be set to leading, lagging and unity. Some of the weaknesses of the synchronous motor needs DC excitation, and the price is relatively expensive. Synchronous reluctance motor (SynRM) don't need DC excitation, is cheaper than synchronous motor, and has relatively constant speed on fluctuating load. Thus, torque characteristics analysis of SynRM and synchronous motor is required, where SynRM can be other options for operating systems that require constant speed with changing load.

This research is performed by comparing the torque characteristic of a SynRM and a synchronous motor without load and under load condition. The load was changed from 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8 and 2.1 Nm. The observed parameters are the voltage, current, active power, power factor, rotor speed, efficiency, and temperature.

Based on the obtained test result, SynRM needs more current and active power than synchronous motor, and the power factor of SynRM is lower than the power factor of synchronous motor at the same load. So the efficiency of SynRM is lower than synchronous motor.

Keywords : SynRM, synchronous motor, torque, efficiency, AC motor

Intisari—Salah satu mesin listrik yang digunakan di industri adalah motor sinkron. Motor sinkron memiliki keunggulan memiliki kecepatan yang relatif konstan pada beban yang berubah-ubah, dan dapat diatur nilai faktor dayanya pada kondisi *leading*, *lagging* dan *unity*. Tetapi motor sinkron juga memiliki kelemahan yaitu motor sinkron membutuhkan eksitasi DC dan harganya yang relatif mahal. Motor reluktans sinkron (SynRM) memiliki keunggulan tidak membutuhkan eksitasi DC, harga motor lebih murah, dan mampu menjaga kecepatan relatif konstan pada beban yang berubah-ubah. Dengan demikian diperlukan analisis unjuk kerja SynRM dan motor sinkron, untuk mengetahui desain SynRM ini dapat menjadi suatu pilihan lain untuk sistem operasi yang membutuhkan kecepatan yang konstan dengan beban yang berubah-ubah.

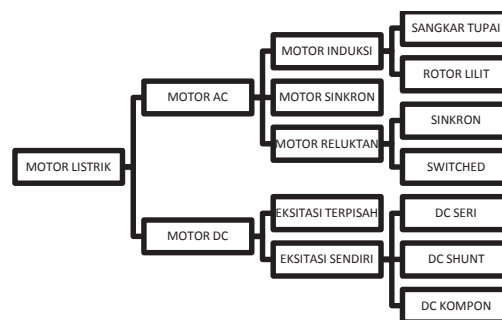
Penelitian ini dilakukan pada saat motor bekerja normal dengan kondisi tanpa beban dan berbeban. Beban pada motor divariasikan pada nilai 0, 0,3, 0,6, 0,9, 1,2, 1,5, 1,8, dan 2,1 Nm. Parameter yang diamati yaitu tegangan, arus, daya aktif, faktor daya, kecepatan rotor, efisiensi dan suhu.

Berdasarkan hasil pengujian terlihat pada beban yang sama, nilai arus dan daya aktif yang ditarik SynRM lebih besar dibandingkan motor sinkron. Sedangkan faktor daya pada SynRM lebih rendah dibandingkan pada motor sinkron. Hal ini mempengaruhi efisiensi pada SynRM yang lebih rendah dibandingkan motor sinkron.

Kata kunci— SynRM, motor sinkron, torsi, efisiensi, motor AC

I. PENDAHULUAN

Berbagai peralatan listrik berupa motor listrik banyak digunakan untuk bekerja baik di industri maupun di rumah. Mayoritas hal yang diperhatikan yaitu kemampuan suatu mesin listrik mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Nilai torsi yang tinggi, rasio volume, dan keandalan sama pentingnya dengan desain yang murah serta operasi motor yang mudah dalam memilih motor listrik. [1]. Berbagai jenis motor listrik diteliti, dan didesain untuk memenuhi kebutuhan masyarakat tersebut. Klasifikasi motor dapat dilihat pada gambar 1 berikut ini :



Gambar 1. Klasifikasi Motor

Motor sinkron dengan sikat memiliki nilai torsi awal yang tinggi dan dapat dikontrol pada rentang yang lebar pada kecepatan putarnya. Akan tetapi penggunaan motor sinkron dengan sikat, memunculkan biaya tambahan. Biaya tambahan tersebut adanya penggantian sikat yang aus akibat kontak mekanis. Salah satu metode untuk memperbaiki kekurangan motor sinkron dengan sikat tersebut yaitu mengganti sistem sikat dengan sistem tanpa sikat. Motor sinkron tanpa sikat tidak memiliki lilitan eksitasi pada bagian rotor. PMSM dan SynRM dengan komutator elektronik merupakan motor sinkron tanpa sikat yang paling menarik sebagai motor modern yang terus dioptimalkan [1]. Contoh penggunaan motor sinkron yaitu pada mesin penghancur (*crusher*), *rotary kilns*, *variable-speed ball mills* dan lain-lain [2].

SynRM tidak memiliki rugi tembaga di rotor dibandingkan motor induksi, mempunyai struktur rotor yang lebih murah dibandingkan motor sinkron, dan memiliki ripple torsi dan *noise* yang rendah dibandingkan *switched reluctance motor* [3]. SynRM mempunyai karakteristik yang menyerupai motor sinkron. Motor reluktans sinkron (*synchronous reluctance motor/SynRM*) didesain agar kecepatan medan putar stator sinkron dengan putaran rotor. SynRM dikembangkan untuk mengatasi kekurangan dari motor sinkron. SynRM didesain tidak membutuhkan bantuan eksitasi DC, dan tidak memiliki

lilitan di bagian rotornya. Tidak adanya lilitan di bagian rotor membuat SynRM tidak memiliki rugi daya di bagian rotornya.

Dengan demikian diperlukan analisis karakteristik torsi SynRM dan motor sinkron, dimana SynRM ini dapat menjadi suatu pilihan lain untuk sistem operasi yang membutuhkan kecepatan yang konstan dengan beban yang berubah-ubah.

II. LANDASAN TEORI

A. Dasar Mesin AC

1) Sistem Per Unit

Untuk menggeneralisasi pengukuran dengan sistem pu, pengukuran terdiri dari satu atau lebih nilai basis. Nilai tersebut digunakan sebagai nilai pembanding hal yang serupa. Nilai pu dapat diketahui dengan cara sebagai berikut [2] :

$$pu = \frac{\text{nilai aktual}}{\text{nilai basis}} \quad (1)$$

2) Aliran Daya

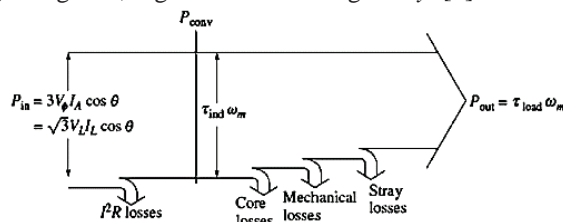
Motor AC berfungsi mengubah energi listrik (*input*) menjadi energi mekanik (*output*). Tetapi tidak semua daya masukan pada motor AC dapat dikonversi menjadi daya keluaran, selalu ada rugi daya yang berhubungan dengan prosesnya [4].

$$P_{\text{masukan}} = P_{\text{keluaran}} + P_{\text{rugi}} \quad (2)$$

Efisiensi adalah kemampuan mesin AC untuk mengubah *input* menjadi *output*. Semakin besar nilai efisiensi, semakin baik kerja mesin tersebut. Nilai efisiensi dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$\eta = \frac{P_{\text{keluaran}}}{P_{\text{masukan}}} \times 100\% \quad (3)$$

Salah satu teknik yang mudah untuk menghitung rugi daya dalam mesin adalah diagram aliran daya. Diagram aliran daya untuk motor ac ditunjukkan pada gambar 2. Pada gambar tersebut daya listrik yang dihasilkan merupakan daya sisa hasil pengurangan daya mekanik dengan rugi inti, rugi mekanik dan rugi *stray*. [4]



Gambar 2. Diagram aliran daya motor ac

Berdasarkan gambar 2, nilai daya masukan dan daya keluaran motor AC:

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_L \cdot \cos\theta \quad (4)$$

$$P_{out} = \tau_{load} \cdot \omega_m \quad (5)$$

$$\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m} \quad (6)$$

B. Synchronous Machine

Synchronous machine (SM) adalah motor dan generator dimana arus medan magnet dihasilkan dari

sumber dc yang terpisah, sedangkan *induction machines* adalah motor dan generator dimana arus medan diinduksikan ke kumparan medannya melalui medan magnets [5]. Ketika dioperasikan sebagai motor (dengan menyambung SM dengan sumber tegangan), *synchronous machine* disebut sebagai motor sinkron [2]. Pada motor sinkron, arus ac mengalir di kumparan jangkar dan eksitasi dc menyuplai kumparan medan. Kumparan jangkar hampir selalu di stator dan biasanya berupa kumparan 3 fase. Sedangkan kumparan medan berada di rotor. Medan magnet dihasilkan dari arus jangkar yang berputar pada kecepatan sinkron. Pada motor sinkron, kecepatan pada kondisi normal ditentukan oleh jumlah *pole* dan frekuensi arus jangkar [4]. Karena frekuensi sumber tetap, kecepatan motor cenderung konstan, terlepas besarnya beban atau tegangan sumber [2].

Pada motor sinkron, torsi elektromagnetik memiliki arah putaran yang berlawanan dengan besar torsi menyesuaikan torsi yang dibutuhkan untuk memutar beban mekanik. Fluks yang dihasilkan oleh arus jangkar dari motor sinkron berputar mendahului fluks yang dihasilkan oleh arus medan, hingga medan tertarik dan rotor ikut berputar. [4].

C. Synchronous Reluctance Motor

Synchronous reluctance motor (dengan rotor kutub menonjol tanpa lilitan medan) merupakan salah satu motor listrik tua tipe *single saliency* yang telah menarik perhatian dari para peneliti [6, 7], dimana torsi keluaran dikembangkan berdasarkan perubahan nilai reluktans rotor. SynRM memiliki banyak keunggulan dibandingkan motor AC lain [8, 9]. Sebagai contohnya, SynRM memiliki konstruksi yang simpel dan kuat, rotor SynRM tidak memiliki lilitan dan material magnet, serta konfigurasi yang lebih murah dibandingkan motor AC lain. [6, 10, 9]. Meskipun operasinya dipengaruhi oleh banyak faktor, SynRM tetap merupakan motor sinkron paling simpel [11].

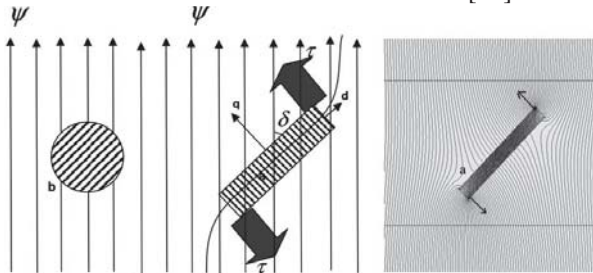
Prinsip kerja SynRM (*Synchronous Reluctance Motor*) menggunakan konsep reluktansi dan perputaran sinusoidal MMF, yang dapat dihasilkan oleh stator IM sederhana, untuk menghasilkan torsi. Konsep torsi reluktans adalah konsep yang sudah ada sejak lama sebelum tahun 1900. [12] [13].

Ide utama dari konsep reluktans dapat dijelaskan pada gambar 3. Pada gambar 3, benda (a) dengan material magnet anisotropis memiliki perbedaan (geometris) reluktans di sumbu d dan sumbu q, sementara benda (b) dengan material magnet isotropis memiliki reluktans yang sama di semua sisi [12].

Medan magnet (ψ) yang mengenai benda anisotropis mampu menghasilkan torsi apabila terdapat perbedaan sudut antara sumbu d dengan medan magnet ($\delta \neq 0$). Hal ini jelas jika sumbu d dari benda tidak lurus dengan medan magnet, yang akan membuat terjadinya medan distorsi dalam medan utama. Arah utama dari medan distorsi lurus sepanjang sumbu q benda tersebut [12].

Medan magnet SynRM dihasilkan oleh distribusi lilitan pada slot stator secara sinusoidal dan jalur antara

stator dan rotor yang berupa celah udara yang sempit, tepatnya pada IM tradisional. Medan magnet akan berputar pada kecepatan sinkron dan dapat diasumsikan memiliki distribusi sinusoidal [12].



Gambar 3. Sebuah benda dengan geometri anisotropis (a) dan geometri isotropis (b) dalam medan magnet ψ dan mekanisme produksi torsi

Dalam situasi ini akan muncul torsi yang mengurangi energi potensial sistem dengan mengurangi besar medan distorsi di sumbu q ($\delta \rightarrow 0$). Jika (δ) sudut beban dapat dijaga konstan, torsi elektromagnetik akan terus dikonversi menjadi torsi mekanik [12].

Arus pada stator berfungsi untuk menghasilkan medan magnet utama, dan produksi torsi dengan mengurangi medan distorsi. Hal ini dapat dilakukan dengan mengontrol sudut arus yang merupakan sudut antara vektor arus pada lilitan stator dengan sumbu d rotor (θ) pada *synchronous reference frame* [12].

III. METODOLOGI PENELITIAN

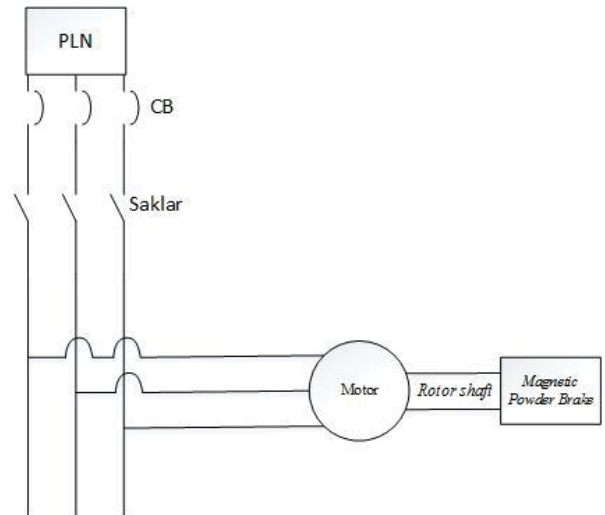
A. Alat

Alat yang digunakan untuk penelitian ini adalah laptop dengan sistem operasi windows 8, *synchronous machine* 0,3 kW, *synchronous reluctance motor* 0,26 kW, tachometer digital, termometer laser infra merah, nanoVIP power meter, dan *magnetic powder brake*.

B. Bahan

Pada penelitian ini menggunakan sumber data yang relevan. Sumber data yang utama pada penelitian ini adalah dari beberapa buku karya ilmiah dan jurnal yang berkaitan tentang *synchronous machines* dan *synchronous reluctance motor*.

Secara umum, rangkaian pengujian pada penelitian ini dapat digambarkan pada gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4. Rangkaian uji

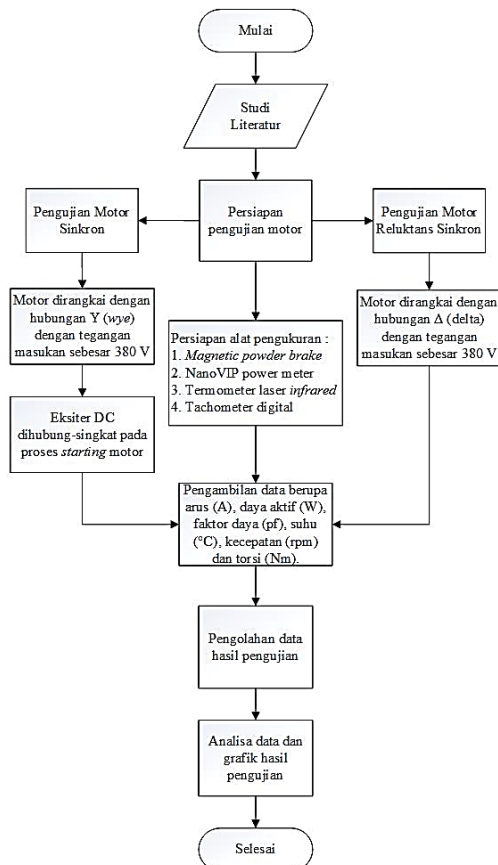
Kondisi operasi motor yang digunakan pada pengujian ini yaitu :

Tabel 1. Nameplate motor

	Motor sinkron Leybold tipe 732 36	SynRM Leybold tipe 732 45
Daya Output	0,3 kW	0,26 kW
Tegangan (Δ/Y)	(660/380)V	380 V
Arus nominal	0,8 A	1,2 A
Cos phi	1	0,55
Kecepatan	1.500 rpm	1.500 rpm
Kelas Isolasi	F	F
Tingkat Proteksi	23	54
Standar	VDE 0530	VDE 0530

C. Diagram Alir Penelitian

Diagram penelitian dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir penelitian

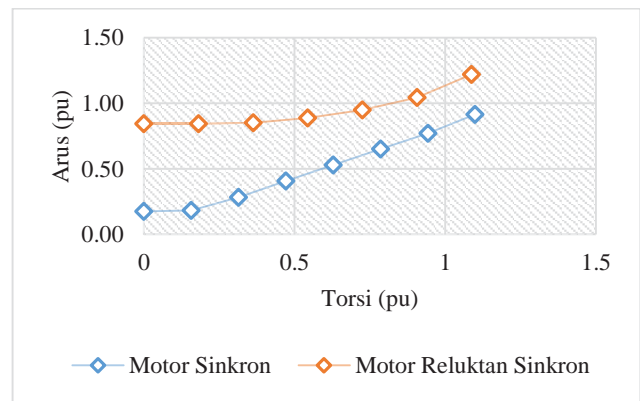
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang diambil dalam penelitian ini yaitu tegangan (V), arus (A), daya aktif (W), faktor daya (pf), suhu ($^{\circ}\text{C}$), dan torsi (Nm). Data hasil pengujian digunakan untuk mengetahui karakteristik torsi pada motor sinkron, karakteristik torsi pada SynRM dan perbandingan karakteristik torsi pada kedua motor tersebut.

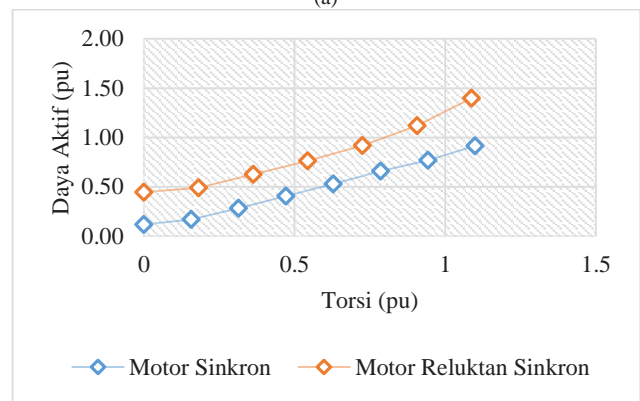
Tabel 2. Data basis yang digunakan pada SynRM dan motor sinkron

Nilai basis	SynRM	Motor sinkron
P_{input}	433,884 W	525,92 W
P_{output}	260 W	300 W
I_{input}	1,2 A	0,8 A
τ	1,65 Nm	1,91 Nm

A. Perbandingan hasil pengujian pengaruh torsi terhadap arus input dan daya input pada SynRM dan motor sinkron



(a)



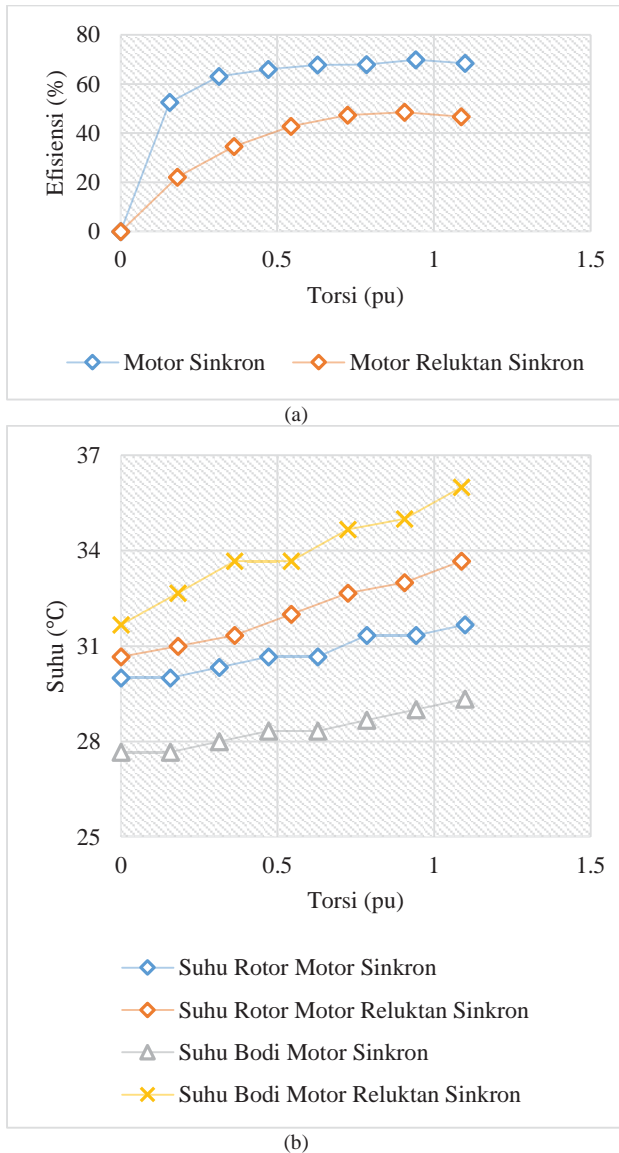
(b)

Gambar 6. Perbandingan nilai pengujian motor sinkron dan SynRM: (a) Grafik I terhadap τ , (b) dan Grafik P terhadap τ

Gambar 6 menunjukkan tanggapan kedua motor pada kondisi berbeban. Kedua motor menunjukkan semakin besar pembebanan, semakin besar arus *armature* dan daya aktif masukan yang ditarik dari sumber. Walaupun kedua motor menunjukkan tanggapan yang sama, nilai daya aktif dan arus yang terukur dari kedua motor sangat berbeda. Pada kondisi awal tanpa beban, motor sinkron menarik arus sebesar 0,18 pu dan daya aktif 0,12 pu. Sedangkan SynRM menarik arus 0,85 pu dan daya aktif 0,44 pu. Pada beban yang dipikul motor sebesar $\pm 0,9$ pu, motor sinkron menarik arus dan daya aktif sebesar 0,77 pu. Sedangkan SynRM menarik arus sebesar 1,04 pu dan daya aktif sebesar 1,12 pu.

Meskipun arus awal yang dibutuhkan oleh SynRM lebih besar dibandingkan motor sinkron, pada gambar 6(a) grafik arus SynRM lebih landai dibandingkan grafik arus motor sinkron. Hal ini disebabkan arus yang digunakan oleh SynRM untuk berputar pada kecepatan sinkron berasal dari sumber. Sedangkan pada motor sinkron, untuk menghasilkan kecepatan sinkron, arus pada rotor mendapat suplai dari arus searah. Pada gambar 6(b) terlihat untuk daya keluaran yang sama, daya masukan yang ditarik SynRM dari system lebih besar daripada motor sinkron. Hal ini yang kemudian mempengaruhi nilai efisiensi pada SynRM yang lebih rendah dibandingkan motor sinkron.

B. Perbandingan hasil pengujian pengaruh torsi terhadap efisiensi dan suhu pada SynRM dan motor sinkron



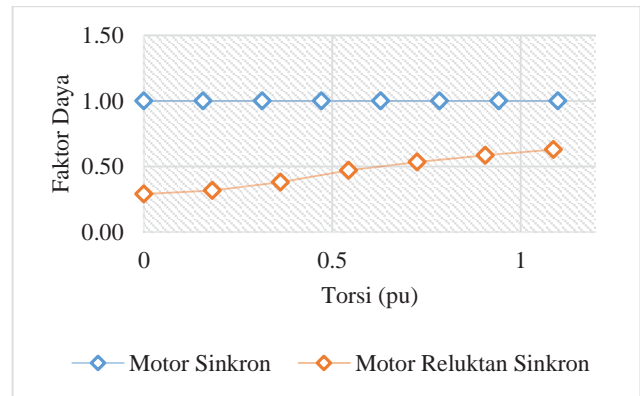
Gambar 7. Perbandingan nilai pengujian motor sinkron dan SynRM: (a) Grafik η terhadap τ , (b) dan Grafik T terhadap τ

Berdasarkan gambar 7(a), terlihat efisiensi SynRM dan motor sinkron menurun pada pembebanan lebih dari 1 pu. Nilai efisiensi menurun, karena SynRM dan motor sinkron memiliki batas kemampuan dalam menghasilkan daya keluaran. Pada nilai pembebanan tertentu, rugi daya yang dihasilkan lebih besar dibandingkan daya keluaran. Sehingga nilai efisiensi akan menurun.

Berdasarkan gambar 7(b), terlihat suhu SynRM selalu lebih tinggi dibandingkan motor sinkron pada beban yang sama. Pada besar beban $\pm 1,1$ pu, suhu rotor motor sinkron sebesar $31,67^\circ\text{C}$, dan suhu bodinya $29,33^\circ\text{C}$ sedangkan suhu rotor SynRM sudah mencapai $33,67^\circ\text{C}$, dan suhu bodinya 36°C . Selain itu kenaikan suhu pada SynRM lebih curam dibandingkan motor sinkron. Kenaikan suhu ini berkaitan dengan rugi daya yang dihasilkan. Semakin besar *losses* yang terjadi pada SynRM, semakin tinggi suhu yang terukur pada SynRM.

Sebagaimana yang telah dipahami, indikasi terjadinya *losses* (rugi daya) adalah panas. Semakin besar *losses*, panas yang ditimbulkan juga semakin besar.

C. Perbandingan hasil pengujian pengaruh torsi terhadap faktor daya pada SynRM dan motor sinkron



Gambar 8. Perbandingan nilai pengujian motor sinkron dan SynRM: Grafik faktor daya terhadap τ

Gambar 8 menunjukkan pengaruh besar pembebanan terhadap faktor daya kedua motor. Pada motor sinkron, adanya arus eksitasi membuat faktor daya pada motor sinkron dapat diatur pada kondisi *leading*, *lagging* atau *unity*. Sedangkan faktor daya SynRM tidak dapat diatur seperti pada motor sinkron, faktor daya SynRM selalu pada kondisi *lagging* seperti pada motor induksi. Karena faktor daya SynRM tidak dapat diatur *unity*, nilai daya reaktif selalu muncul. Besarnya faktor daya tergantung daya aktif dan daya reaktif yang dibutuhkan SynRM di tiap pembebanan. Semakin besar pembebanan, semakin besar nilai faktor daya SynRM. Kenaikan nilai faktor daya pada SynRM disebabkan penambahan konsumsi daya aktif lebih besar dibandingkan konsumsi daya reaktif.

V. KESIMPULAN

Perbedaan karakteristik torsi antara motor sinkron dan SynRM adalah pada besar nilai arus, daya aktif dan faktor daya pada saat pengujian. Untuk beban yang sama, nilai arus, dan daya aktif yang ditarik SynRM lebih besar dibandingkan motor sinkron. Sedangkan faktor daya pada SynRM lebih rendah dibandingkan pada motor sinkron. Hal ini mempengaruhi efisiensi pada SynRM yang lebih rendah dibandingkan motor sinkron.

REFERENSI

- [1] L. Lavrinovicha och J. Dirba, "Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motor and Synchronous Reluctance Motor Based on Their Torque per Unit Volume," i *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference*, Rakvere, 2014.
- [2] T. Wildi, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems 5E*, New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [3] J. Soltani, H. A. Zarchi, G. R. A. Markadeh och H. W. Ping, "Adaptive Speed Tracking Control of Three-Phase Synchronous Reluctance Motor Taking the Iron Loss Resistance into Account," i *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Seoul, 2007.

- [4] A. E. Fitzgerald, J. Charles Kingsley och S. D. Umans, *Electric Machinery Sixth Edition*, New York: The McGraw-Hill Companies Inc, 2003.
- [5] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals 4th Edition*, New York: The McGraw-Hill Companies Inc, 2005.
- [6] T. Radwan, E.M.Rashad, M. N. Uddin och M. Rahman, "Fuzzy-Logic-Based Controller For Synchronous Reluctance Motor," i *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2004.
- [7] T. Matsuo och T. A. Lipo, "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, nr 2, pp. 359-365, 1994.
- [8] Y.-J. Luo, G.-J. Hwang och K.-T. Liu, "Design of Synchronous Reluctance Motor," i *Electrical Electronics Insulation Conference, and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, Rosemont, IL, 1995.
- [9] T.-H. Liu och H.-H. Hsu, "Adaptive Controller Design for Synchronous Reluctance Motor with Direct Torque Control," i *The International Conference on "Computer as a Tool"*, Warsaw, 2007.
- [10] C. Mademlis, "Compensation of Magnetic Saturation in Maximum Torque to Current Vector Controlled Synchronous Reluctance Motor Drives," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, nr 3, pp. 379 - 385, 2003.
- [11] O. Dabija, A. Simion, L. Livadaru, N.-D. Irimia och S. Vlasceanu, "Study of a Skewed Rotor Cage Synchronous Reluctance Motor Using Finite Element Analysis," i *International Symposium On Advanced Topics In Electrical Engineering*, Bucharest, 2013.
- [12] R. R. Moghaddam, "Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design," KTH Electrical Engineering, Stockholm, 2007.
- [13] G. Brown, "Developing Synchronous Reluctance Motors for Variable Speed Operation," i *6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)*, Bristol, 2012.