

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Telaah Penelitian**

Bansal (2005) mengungkapkan bahwa motor induksi 3 fase dapat dioperasikan sebagai generator induksi. Hal ini ditunjukkan dari diagram lingkaran mesin pada daerah slip negatif. Ini berarti bahwa agar mesin induksi 3 fase dapat beroperasi sebagai generator maka rotornya harus berputar lebih cepat daripada kecepatan medan magnet di statornya sehingga dihasilkan slip negatif. Pada kondisi ini daya aktif mengalir dari mesin, namun mesin membutuhkan daya reaktif. Agar terminal generator menghasilkan tegangan, maka eksitasi harus disediakan. Daya eksitasi ini bisa berasal dari jaringan (mesin menjadi semacam beban) atau bila sistem terisolasi (*stand-alone*) harus terhubung dengan suatu bank kapasitor yang cukup.

Besarnya kapasitor eksitasi yang diperlukan dapat diprediksi dengan melakukan pemodelan matematis. Boora (2010) memaparkan bahwa karakteristik generator induksi 3 fase tereksitasi diri yang dimodelkan pada kondisi seimbang dan tak seimbang sangat ditentukan oleh nilai kapasitor eksitasi. Karena generator induksi yang dianalisis dalam kondisi *stand alone* maka frekuensi medan putar di belitan statornya akan berubah seiring dengan perubahan kecepatan rotor dan menghasilkan slipnya yang nilainya tetap kecil. Hasil lainnya menunjukkan efisiensi generator induksi mempunyai nilai yang tinggi.

Generator induksi mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan dengan

generator sinkron antara lain harga unitnya murah, konstruksinya kuat dan sederhana, mudah dalam pengoperasiannya, memerlukan sedikit perawatan, dan mempunyai keandalan yang tinggi (Ouhrouche, 1995). Menurut Bansal (2005) keunggulan generator induksi lainnya adalah reduksi *unit cost* dan ukuran, tanpa sikat, ketiadaan sumber DC terpisah, kemampuan proteksi diri terhadap beberapa kondisi beban lebih dan hubung singkat.

Generator induksi dapat diterapkan pada sistem pembangkit tenaga angin dimana mesin atau kincir angin yang memutar generator tidak mengharuskan pada kecepatan sinkronnya agar dihasilkan tegangan. Dengan demikian, jika daya yang dibangkitkan tidak mensyaratkan frekuensi dan tegangan tetap maka generator dapat dioperasikan *stand alone* atau terisolasi, terlepas dari saluran publik (Irianto, 2004).

Mesin induksi yang tersedia di pasaran untuk daya yang besar biasanya merupakan mesin induksi 3 fase. Apabila digunakan sebagai generator, maka juga akan menghasilkan keluaran 3 fase. Dalam kenyataannya, mayoritas beban listrik yang digunakan masyarakat luas adalah peralatan satu fasa sehingga lebih tepat digunakan generator 1 fase. Fukami et al (1999) melaporkan bahwa mesin induksi 3 fase dapat digunakan sebagai generator induksi 1 fase pada suatu sistem yang tidak terhubung dengan jala-jala listrik (*stand alone*). Agar menghasilkan tegangan tertentu maka pada generator tersebut harus dihubungkan kapasitor eksitasi dengan ukuran tertentu.

Dalam penelitian ini, kami mengusulkan pemakaian motor induksi 1 fase sebagai generator induksi. Hal ini dilatarbelakangi kenyataan bahwa motor ini

mempunyai kapasitas daya yang kecil, jumlahnya fasanya hanya satu, sangat mudah dijumpai di pasaran, dan harganya sangat terjangkau sehingga sangat cocok untuk aplikasi pada pembangkit skala kecil di daerah terpencil. Untuk tujuan ini maka akan diteliti karakteristik dari generator induksi 1 fase dalam kondisi tereksitasi diri dengan memanfaatkan bank kapasitor.

Ada beberapa permasalahan yang perlu dipecahkan terkait dengan pemanfaatan generator induksi sebagai pembangkit. Supardi (2009) memaparkan bahwa generator induksi 3 fase tereksitasi diri bisa menghasilkan harmonik. Tegangan generator induksi yang diteliti pada saat tanpa beban mengalami distorsi sebesar 16,7–20,7% dari komponen fundamentalnya. Harmonisa orde ke-3 adalah yang paling dominan dibanding dengan yang lainnya. Pemasangan beban lampu LHE (Lampu Hemat Energi) dan lampu TL (*Tube Lamp*) dengan ballast lilitan mengakibatkan keluaran generator menjadi lebih terdistorsi. Sumbangan lampu LHE terhadap distorsi harmonik lebih besar dari lampu TL dengan ballast lilitan. Dengan menggunakan filter harmonik orde ke-3 (terhubung seri) dan orde 5 (terhubung paralel) maka distorsi harmoniknya dapat diselesaikan karena nilainya sudah memenuhi standar IEEE 519 ( $THD-V < 5\%$  dan  $THD-I < 15\%$ ). Ouhrouche and Chaine (1995) memaparkan bahwa generator induksi yang terhubung dengan kapasitor menjadi *self excited* jika dilepaskan dari jala-jala listrik. Nilai reaktans magnetisasinya turun sehingga bisa menyebabkan *ferroresonance*. Gelombangnya menjadi sangat terdistorsi sehingga peralatan proteksi dapat salah merespon.

Permasalahan lainnya yang muncul terkait dengan aplikasi generator

induksi adalah tegangan dan frekuensi output generator induksi pada pengoperasian pembangkit *stand-alone* sangat sensitif terhadap perubahan beban. Hal ini akan menyebabkan generator induksi beroperasi pada tegangan dan frekuensi output yang berfluktuatif pada perubahan beban. Oleh karena itu perlu dilakukan pengaturan tegangan dan frekuensi generator induksi. Marinescu dan Ion (2009) mengusulkan sebuah metode yang dapat digunakan untuk mengatur tegangan dan frekuensi output generator induksi yaitu dengan menggunakan rangkaian *Voltage Source Inverter (VSI)*. Dengan metode ini keluaran generator induksi diubah menjadi tegangan searah dan kemudian diubah lagi menjadi tegangan bolak-balik yang konstan magnitudenya. Asy'ari (2010) mengusulkan pemakaian *storage*. Dengan menggunakan *storage* maka tegangan output, putaran rotor dan frekuensi menjadi stabil pada saat pembebanan dilakukan dibandingkan pada saat tanpa menggunakan *storage*. Pengaturan tegangan lainnya dilakukan dengan cara menambah satu induktor yang menjadikan generator induksi jenuh pada tegangan nominalnya (Widmer dan Arter, 1992). Pengaturan ini sangat sederhana dan tidak memerlukan elemen kendali yang banyak. Kelemahannya ialah karena besar kapasitor eksitasinya konstan maka akan menghasilkan kelebihan arus reaktif saat beban nol. Kelebihan arus reaktif akan mengakibatkan kelebihan arus eksitasi pada generator sehingga generator akan menghasilkan tegangan tinggi yang dapat merusak generator. Murthy et al. (1993) melaporkan bahwa unjuk kerja daripada kapasitor seri sebagai strategi untuk mengontrol tegangan generator induksi adalah kurang memuaskan. Kondisi ini diperbaiki dengan menggunakan strategi pengaturan tegangan menggunakan

transformator tegangan. Kelemahannya adalah harga trafo tegangan tersebut mahal. Jayaramaiah dan Fernandes (2006) mengusulkan kontrol tegangan generator induksi dengan menggunakan PWM (*Pulse Width Modulated*) VSI. Peralatan kontrol ini memerlukan biaya yang mahal yang merupakan salah satu isu terkait pengembangan pembangkit berkapasitas kecil. Suatu model kontrol dengan menggunakan chopper yang mensuplai beban resistif juga diusulkan oleh Ammasaigounden(1999) dimana daya yang disuplai ke beban komplemen dikendalikan dengan bervariasi *duty cycle* dari chopper. Karena chopper mendapatkan suplai daya dari tegangan DC konstan maka model ini tidak direkomendasikan untuk sistem dengan beban bolak-balik. Ahmed et al. (2003) mengusulkan kompensator VAR statis yang terdiri dari kapasitor paralel yang dipindahhubungkan dengan menggunakan thyristor.

Dalam penelitian ini untuk mengatur tegangan keluaran dari generator induksi kami mengusulkan suatu rangkaian kontrol elektronis yang berbasis PLC yang akan mengendalikan alokasi beban komplemen dari generator induksi. Ketika beban listrik yang dinyalakan pelanggan hanya berdaya kecil maka kontroler akan menyalakan beban komplemen berdaya besar, begitu juga sebaliknya. Dengan demikian generator induksi akan merasakan daya yang tetap pada terminal keluarannya.

## **2.2. Landasan Teori**

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik (AC) yang paling luas digunakan dalam setiap aplikasi industri maupun rumah tangga. Motor ini

memiliki konstruksi yang kuat, sederhana, handal, dan murah harganya. Di samping itu motor ini juga memiliki efisiensi yang tinggi saat berbeban penuh dan tidak membutuhkan perawatan yang banyak.

### **2.2.1. Generator Induksi Dan Definisinya**

Generator induksi adalah mesin induksi yang bekerja sebagai generator, oleh karena itu mesin induksi mempunyai persamaan dan konstruksi yang sama untuk generator maupun untuk motor. Prinsip kerja generator induksi merupakan kebalikan dari motor induksi. Ketika mesin berfungsi sebagai motor, kumparan stator diberi tegangan sehingga akan timbul medan putar dengan kecepatan sinkron. Namun jika motor berfungsi sebagai generator, pada rotor motor diputar oleh sumber penggerak dengan kecepatan lebih besar daripada kecepatan sinkronnya. Bila suatu konduktor berputar di dalam medan magnet (kumparan stator) maka akan dibangkitkan tegangan.

Arus pada rotor ini akan berinteraksi dengan medan magnet pada kumparan stator sehingga timbul arus pada kumparan stator sebagai reaksi atas gaya mekanik yang diberikan. Pada proses perubahan motor induksi menjadi generator induksi dibutuhkan daya reaktif atau daya magnetisasi untuk membangkitkan tegangan pada terminal keluarannya. Dalam hal ini yang berfungsi sebagai penyedia daya reaktif adalah kapasitor yang besarnya disesuaikan dengan daya reaktif yang diperlukan.

Kebutuhan daya reaktif dapat dipenuhi dengan memasang suatu unit kapasitor pada terminal keluaran, dimana kapasitor menarik daya reaktif kapasitif

atau dengan kata lain kapasitor memberikan daya reaktif induktif pada mesin induksi. Kerja dari kapasitor ini dapat dipandang sebagai suatu sistem penguat (eksitasi) sehingga generator induksi juga dikenal dengan sebutan generator induksi penguatan sendiri (*self excited of induction generator*).

Hal terpenting yang harus diperhatikan dalam kinerja generator induksi adalah fluks sisa atau medan magnet pada kumparan stator. Tanpa adanya fluks sisa maka proses pembangkitan tegangan tidak akan terjadi. Dengan adanya fluks sisa ini dan perputaran rotor akan menimbulkan tegangan induksi pada rotor. Tegangan induksi ini akan terinduksi pula pada sisi stator dan akan menimbulkan arus yang akan mengisi kapasitor hingga terjadi keseimbangan. Keseimbangan tersebut ditandai dengan titik pertemuan antara lengkung magnetisasi dengan garis reaktansi kapasitif.

### **2.2.2. Generator Induksi Dan Definisinya**

Dalam aplikasinya generator induksi dibagi menjadi dua jenis yaitu generator induksi masukan ganda (*Doubly Fed Induction Generator* atau *DFIG*) dan generator induksi berpenguat sendiri (*Self Excited Induction Generator* atau *SEIG*). Pembagian jenis generator ini berdasarkan pada sumber eksitasi generator berasal. Eksitasi pada generator induksi dibutuhkan untuk menghasilkan medan magnet pada rotor generator untuk selanjutnya menghasilkan induksi elektromagnetik pada stator yang akan menghasilkan energi listrik. Selain itu eksitasi juga dibutuhkan untuk mengkompensasi daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator dalam membangkitkan listrik.

## **1. Generator Induksi Masukan Ganda**

Pada generator induksi masukan ganda, eksitasi diperoleh dari jaringan listrik yang telah terpasang. Generator induksi jenis ini menyerap daya reaktif dari jaringan listrik untuk membangkitkan medan magnet yang dibutuhkan. Pada generator jenis ini, terminal keluaran generator dihubungkan dengan inverter yang kemudian dihubungkan dengan bagian generator. Generator induksi masukan ganda saat ini banyak digunakan sebagai generator pada pembangkit listrik tenaga baru.

Pada generator induksi masukan ganda terdapat dua buah inverter yang menghubungkan antara keluaran generator dengan rotor. Kedua inverter tersebut dihubungkan dengan penghubung as. Inverter yang terhubung dengan jaringan bekerja pada frekuensi yang sama dengan frekuensi jaringan. Inverter ini juga mengatur besar faktor daya yang masuk agar sesuai dengan besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator. Inverter yang terhubung dengan rotor bekerja pada frekuensi yang sesuai dengan frekuensi putaran generator. Dengan menggunakan konfigurasi seperti ini, besar arus yang mengalir pada rotor dapat di atur sesuai dengan daya yang akan dibangkitkan.

Keuntungan dari generator induksi masukan ganda diantaranya adalah tegangan dan frekuensi yang dihasilkan dapat tetap besarnya walaupun kecepatan putarnya berubah-ubah. Namun generator jenis ini membutuhkan inverter sebagai pengatur tegangan pada rotor dan juga rotor jenis kumparan karena generator ini membutuhkan sumber pada rotornya. Dengan demikian tidak semua jenis mesin induksi dapat digunakan sebagai generator induksi jenis ini. Selain itu generator

ini juga membutuhkan jaringan listrik untuk dapat beroperasi, karena sumber daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator berasal dari jaringan. Apabila tidak ada jaringan listrik atau generator lain yang memberikan daya reaktif maka generator jenis ini tidak dapat beroperasi. Selain itu jika terjadi gangguan pada jaringan atau *blackout* jaringan generator ini juga tidak dapat beroperasi.

## **2. Generator induksi berpenguat sendiri**

Pada generator induksi berpenguat sendiri, eksitasi diperoleh dari kapasitor yang dipasang parallel pada terminal keluaran generator. Generator induksi jenis ini bekerja seperti mesin induksi pada daerah saturasinya hanya saja terdapat bank kapasitor yang dipasang pada terminal statornya. Karena sumber eksitasi generator ini berasal dari kapasitor yang dipasang pada terminalnya maka mesin induksi dengan rotor kumparan maupun sangkar tupai dapat digunakan sebagai generator induksi berpenguat sendiri.

Generator induksi jenis ini memiliki beberapa keuntungan yaitu:

1. Tidak membutuhkan pengaturan tegangan pada rotornya.
2. Tidak memerlukan inverter.
3. Desain peralatan yang tidak rumit.
4. Harga pembuatan lebih murah.
5. Perawatan yang diperlukan murah dan tidak sulit.
6. Tidak memerlukan jaringan listrik untuk dapat beroperasi

Generator induksi berpenguat sendiri juga dapat beroperasi dalam suatu jaringan listrik dan tetap dapat beroperasi walaupun terdapat gangguan pada

jaringan. Oleh karena itu, generator induksi berpenguat sendiri lebih fleksibel dalam pengoperasiannya.

Generator induksi berpenguat sendiri merupakan pilihan yang tepat untuk memenuhi kebutuhan energi di tempat yang terisolir dimana daya reaktif dari jaringan listrik tidak atau belum ada. Sumber energi yang digunakan untuk mensuplai generator dapat berasal dari sumber energi yang tidak terlalu besar jumlahnya, seperti kincir angin ataupun kincir air di sungai (yang biasa dikenal dengan pembangkit listrik tenaga mikrohidro).

Dengan melihat kondisi di Indonesia dimana terdapat beberapa daerah yang belum terjangkau listrik, generator induksi berpenguat sendiri merupakan salah satu solusi yang tepat. Hal ini karena generator induksi berpenguat sendiri dapat beroperasi sendiri tanpa adanya jaringan listrik. Dengan melihat besarnya sumber energi yang dimiliki Indonesia yang masih belum tereksplorasi secara maksimal kesempatan menggunakan generator induksi berpenguat sendiri sebagai pembangkit listrik masih cukup besar. Sebagai negara kepulauan, Indonesia mempunyai banyak sungai. Di daerah pedalaman sekalipun biasanya terdapat sungai. Sungai-sungai ini dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga mikrohidro untuk memenuhi kebutuhan listrik desa-desa di sekitarnya yang belum terjangkau jaringan listrik. Dengan melihat kenyataan ini maka dapat diketahui bahwa kesempatan penggunaan generator induksi berpenguat sendiri cukup besar. Oleh karena itu dibutuhkan pengembangan teknologi pendukungnya agar kualitas energi yang dihasilkannya menjadi lebih baik.

### 2.2.3. Bagian Generator

Dalam generator dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian generator yang berputar (stator) dan bagian generator yang tidak berputar (rotor).

#### 1. Rangka Stator

Rangka stator adalah salah satu bagian utama dari generator yang terbuat dari besi tuang dan ini merupakan rumah dari semua bagian-bagian generator.

#### 2. Stator

Stator terdiri dari stator *core* (inti) dan kumparan stator yang diletakkan pada frame depan dan belakang. Stator *core* dibuat dari beberapa lapis plat besi tipis dan mempunyai alur pada bagian dalamnya untuk menempatkan kumparan stator.

#### 3. Rotor

Rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet. Rotor berputar bersama poros, karena gerakannya maka disebut generator dengan medan magnet berputar. Rotor terdiri dari inti kutub (*pole core*), kumparan medan, poros dan lain lain. Inti kutub berbentuk seperti cakram dan di dalamnya terdapat kumparan medan.

### 2.2.4. Kapasitor

Kapasitor adalah benda fisik yang ciri utamanya bersifat menyimpan muatan. Komponen ini dalam arus bolak balik akan menarik arus yang mendahului terhadap tegangannya dan akan memberikan reaktansi kapasitif sebesar :

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \dots\dots\dots 2.1$$

Dengan sifatnya yang demikian maka kapasitor dapat digunakan untuk memperbaiki faktor daya pada sistem tenaga listrik dan sebagai sumber eksitasi pada generator induksi. Cara menghubungkannya kapasitor dengan sistem tenaga listrik pada prinsipnya ada dua cara yaitu secara seri dan paralel. Kapasitor seri dan paralel ini pada sistem daya menimbulkan daya reaktif yang dapat memperbaiki faktor daya dan tegangan sistem karena dapat menambah kapasitas daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus beban sedang pada kapasitor paralel sebanding dengan kuadrat tegangan.

Umumnya beban pada jaringan listrik adalah beban induktif. Beberapa beban induktif yang ada disebuah jaringan listrik, seperti *heater*, neon, motor listrik, dan lain lain. Beban listrik kebanyakan adalah beban inductive. Untuk menghilangkan/ mengurangi komponen daya inductive ini diperlukan kompensator yaitu kapasitor bank.

## **2.2.5. Penentuan Parameter Motor Induksi**

Data yang diperlukan untuk menghitung performansi dari suatu motor induksi dapat diperoleh dari hasil pengujian tanpa beban, pengujian rotor tertahan, dan pengukuran tahanan dc lilitan stator.

### **2.2.5.1. Pengujian Tanpa Beban ( *No Load Test* )**

Pengujian tanpa beban pada suatu motor induksi akan memberikan informasi tentang arus magnetisasi dan rugi – rugi tanpa beban. Biasanya

pengujian tersebut dilakukan pada frekuensi dan tegangan yang sesuai dengan *name platenya*.

Pengukuran dilakukan setelah motor dinyalakan dalam waktu yang cukup lama, agar bagian – bagian yang bergerak mengalami pelumasan sebagaimana mestinya dan motor telah mencapai kondisi mantapnya. Rugi – rugi rotasional pada waktu dibebani biasanya dianggap konstan dan sama dengan rugi – rugi tanpa beban.

Pada saat tanpa beban, nilai arus rotor sangat kecil dan hanya diperlukan untuk menghasilkan torsi yang cukup untuk mengatasi rugi-rugi di stator. Oleh karena itu rugi – rugi  $I^2R$  pada saat tanpa beban bernilai cukup kecil dan dapat diabaikan.

Nilai slip pada saat motor tanpa beban adalah sangat kecil sehingga akan mengakibatkan tahanan rotor  $R_2/s$  sangat besar. Cabang paralel rotor dan cabang magnetisasi menjadi  $jX_M$  di shunt dengan suatu hambatan yang sangat besar, dan besarnya reaktansi cabang paralel karenanya sangat mendekati  $X_M$ . Besar reaktansi yang tampak  $X_{nl}$  yang diukur pada terminal stator pada keadaan tanpa beban sangat mendekati  $X_1 + X_M$ , yang merupakan reaktansi sendiri dari stator, sehingga

$$X_{nl} = X_1 + X_M \dots\dots\dots 2.2$$

Besarnya reaktansi diri stator ini dapat ditentukan dari pembacaan alat ukur pada keadaan tanpa beban.

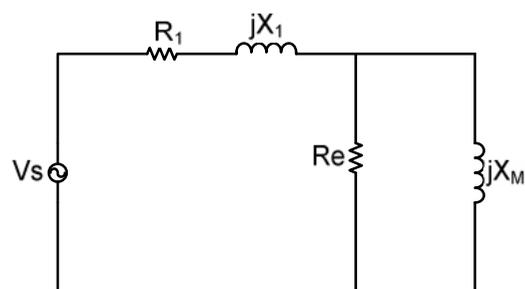
Besarnya tahanan pada pengujian tanpa beban  $R_{nl}$  adalah :

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3I_{nl}^2} \dots\dots\dots 2.3$$

$P_{nl}$  merupakan suplai daya tiga fase pada keadaan tanpa beban, maka besar reaktansi tanpa beban

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} \dots \dots \dots 2.4$$

Sewaktu pengujian tanpa beban, maka rangkaian ekuivalen motor induksi seperti gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian ekuivalen motor induksi saat pengujian beban nol

#### 2.2.5.2. Pengujian Hambatan Stator ( DC test )

Untuk menentukan besarnya hambatan stator ( $R_1$ ) maka dilakukan pengujian dengan sumber daya searah (DC). Pada prinsipnya suatu tegangan searah diberikan pada belitan stator motor induksi. Karena arus yang mengalir pada stator adalah arus searah, maka tidak akan terjadi tegangan induksi pada rangkaian rotor sehingga tidak ada arus yang mengalir pada rotor. Dalam keadaan demikian, reaktansi dari motor juga bernilai nol. Oleh karena itu, arus yang mengalir pada motor hanya dibatasi oleh hambatan stator saja. Untuk melakukan pengujian ini, arus pada belitan stator diatur pada nilai ratingnya dengan tujuan untuk memanaskan belitan stator pada temperatur yang sama selama operasi normal. Besarnya hambatan stator adalah :

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \dots\dots\dots 2.5$$

Dengan diketahuinya nilai dari  $R_1$  maka rugi – rugi tembaga stator pada tanpa beban dapat ditentukan, dan rugi – rugi rotasional dapat ditentukan sebagai selisih dari daya input pada tanpa beban dan rugi – rugi tembaga stator.

### **2.2.5.3. Pengujian Rotor Tertahan (*Block Rotor Test*)**

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan parameter – parameter motor induksi. Pengujian ini biasa juga disebut *blocked rotor test*. Pada pengujian ini rotor dikunci / ditahan sehingga tidak berputar.

Untuk melakukan pengujian ini, tegangan bolak – balik dihubungkan dengan belitan stator dan arus yang mengalir diatur sampai mendekati nilai arus beban penuhnya. Ketika arus telah menunjukkan nilai beban penuhnya, kemudian dilakukan pengukuran tegangan, arus, dan daya yang mengalir ke motor.