

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisis kinerja *Droop Control* dan *Virtual Synchronous Machine* (VSM) pada inverter *grid-forming* untuk nanogrid pesisir berbasis energi gelombang laut, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Variasi daya aktif WEC dari 2,252.7 W pada SS-1 menjadi 3,003.6 W pada SS-2 dan 3,379.1 W pada SS-3 tidak menyebabkan perubahan kondisi sistem yang besar. Daya aktif PCC tetap berada di sekitar 2,069 W dan daya reaktif PCC sekitar 638 var karena beban dipertahankan sama. Deviasi frekuensi maksimum kedua metode tetap berada di sekitar 0.038 Hz, dengan *Droop Control* lebih rendah pada SS-1 dan SS-2, sedangkan VSM lebih rendah pada SS-3. VSM menghasilkan RoCoF maksimum, deviasi tegangan RMS maksimum, dan deviasi tegangan *DC-link* maksimum yang lebih rendah pada ketiga kondisi. Sebaliknya, *Droop Control* menghasilkan THDv yang lebih rendah pada ketiga kondisi. Seluruh nilai THDv berada pada rentang 6.821–6.831% dan masih memenuhi batas 8%. Dengan demikian, perubahan tingkat daya WEC tidak mengganggu kestabilan sistem secara signifikan, tetapi kedua metode memberikan keunggulan yang berbeda pada setiap metrik.
2. Pada skenario perubahan beban aktif dan reaktif, VSM lebih konsisten dalam membatasi respons frekuensi. Pada *load step*, VSM menghasilkan deviasi frekuensi maksimum sebesar 0.24228 Hz dan RoCoF maksimum sebesar 0.24123 Hz/s, lebih rendah daripada *Droop Control* sebesar 0.35458 Hz dan 0.35366 Hz/s. Waktu *settling* VSM juga lebih cepat, yaitu 26 s dibandingkan 31 s. Pada *load shedding*, VSM menghasilkan deviasi frekuensi maksimum sebesar 0.23775 Hz dan RoCoF maksimum sebesar 0.24291 Hz/s, sedangkan *Droop Control* menghasilkan 0.35248 Hz dan 0.35774 Hz/s. Waktu *settling* VSM sebesar 7 s, lebih cepat daripada *Droop Control* sebesar 9 s. Pada

perubahan faktor daya, VSM tetap menghasilkan deviasi frekuensi dan RoCoF yang lebih rendah, tetapi kedua metode belum mencapai kondisi *settling* hingga akhir waktu pengamatan. Keunggulan pada tegangan RMS, tegangan *DC-link*, dan THDv berubah sesuai jenis gangguan sehingga VSM tidak unggul pada seluruh parameter.

3. Evaluasi keseluruhan menunjukkan adanya *trade-off* antara kinerja dinamis dan kompleksitas struktur kontrol. Pada skenario kombinasi, VSM menghasilkan deviasi frekuensi maksimum sebesar 0.23443–0.23937 Hz dan RoCoF maksimum sebesar 0.23265–0.24317 Hz/s, lebih rendah daripada *Droop Control* sebesar 0.34111–0.35166 Hz dan 0.34229–0.35105 Hz/s. Namun, *Droop Control* mencapai waktu *settling* lebih cepat pada SS-1 dan SS-3, sedangkan kedua metode belum mencapai *settling* pada SS-2. Dari sembilan kondisi pengujian, VSM lebih baik pada deviasi frekuensi maksimum dalam 7 kondisi, RoCoF maksimum dalam seluruh 9 kondisi, deviasi tegangan RMS maksimum dalam 7 kondisi, dan deviasi tegangan *DC-link* maksimum dalam 5 kondisi. *Droop Control* menghasilkan THDv lebih rendah dalam 6 kondisi serta memiliki struktur kontrol dan proses *tuning* yang lebih sederhana. Dengan demikian, VSM lebih sesuai ketika pembatasan deviasi frekuensi, RoCoF, dan deviasi tegangan RMS menjadi prioritas, sedangkan *Droop Control* lebih sesuai ketika kesederhanaan kontrol dan THDv yang lebih rendah menjadi pertimbangan utama. Tidak terdapat satu metode yang unggul secara universal karena pemilihannya bergantung pada metrik dan kondisi operasi yang diprioritaskan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model WEC dan PTO secara lebih rinci, sehingga tidak hanya direpresentasikan sebagai sumber DC ekuivalen. Dengan memasukkan dinamika mekanik WEC,

generator, dan PTO, respons sistem terhadap fluktuasi energi gelombang dapat dianalisis secara lebih realistis.

2. Sistem penyimpanan energi, seperti baterai atau superkapasitor, dapat diintegrasikan pada sisi *DC-link* untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kestabilan tegangan DC, deviasi frekuensi, RoCoF, dan waktu *settling* sistem. Penambahan penyimpanan energi juga dapat digunakan untuk menilai sejauh mana fluktuasi daya WEC dapat diredam sebelum masuk ke inverter.
3. Pengujian dapat diperluas dengan variasi jenis beban yang lebih beragam, seperti beban nonlinier, beban tidak seimbang, atau beban dinamis. Hal ini penting karena kondisi beban pada sistem kelistrikan pesisir tidak selalu bersifat linier dan seimbang seperti pada model simulasi dasar.
4. Penelitian selanjutnya dapat memperluas perbandingan *Droop Control* dan VSM dengan metode kontrol *grid-forming* lain, seperti matching control, dispatchable virtual oscillator control, atau adaptive VSM. Perbandingan tersebut dapat memberikan gambaran yang lebih luas mengenai strategi kontrol yang paling sesuai untuk nanogrid pesisir berbasis energi gelombang laut.