

仮想同期発電機制御の慣性定数の選定

理工学研究科 電気電子情報工学専攻
電力システム工学研究

MA21122 林 勇希 はやし ゆうき
指導教員 藤田 吾郎

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの普及に伴う電力システムの安定性の低下について議論されている。VSG (Virtual Synchronous Generator : 仮想同期発電機)制御という同期発電機のような特性を付与することによって課題解決が図られている。一般に、仮想同期発電機の制御パラメータには従来の同期発電機の機器定数を用いることが多い。しかし、制御上で設計するパラメータであるため必ずしも従来のものと同様にする必要はない。本稿の目的は仮想同期発電機の機器定数が電力システムの動的安定性にどのように影響を及ぼすかを明らかにすることである。評価手法は式(1)に示される **Rocof**(Rated of change of frequency:周波数変動率)及び **Nadir**(周波数最大偏差)によって行う。

$$RoCoF = \frac{|F(t_2) - F(t_1)|}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots(1)$$

2. VSG 制御⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

本稿で用いる VSG 制御の有効電力制御部は同期発電機の機械的特性を模擬しており、慣性モーメントとダンピングを導入することで電力システムの安定性の向上が見込まれる。これらのパラメータを変更し、動的安定性への影響について検討する。制御図を Fig. 1 に示す。

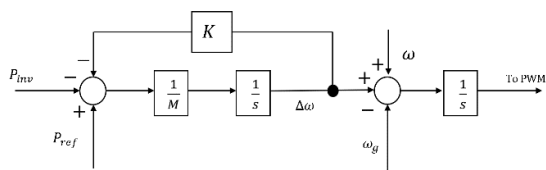


Fig. 1 VSG 制御図

回転子の慣性定数と制動定数を含む同期発電機の回転子の運動方程式は(2)式で示される。

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} - P_{inv} - K\Delta\omega \quad (2)$$

(M : 慣性定数、 K : 制動定数、 ω : 角速度初期値、 ω_g : 同期角速度、 P_{ref} : 有効電力指令値、 P_{inv} : インバータ出力有効電力)

通常、インバータは制御信号に基づき半導体スイッチング素子を駆動させることで出力を得

ており、フィルタを通して電力システムに接続される。本稿ではこれらを電圧源として捉え、制御結果が忠実に出力されるモデルを用いている。また、電圧に関しては一定値を使用している。

3. 出力抑制

既存研究においてインバータの有効電力出力をゼロにしたり、際限なく出力させたりするなどして検討を行っている。しかし、実際のインバータは半導体素子によって構成されており、短時間でも過電流が流れると故障の原因となる。本稿では定格容量以上の有効電力が出力されないように制御を実装している。Fig. 2 は有効電力の出力を一定値以下に制限する制御ブロックである。本稿では、VSG 制御の有効電力の出力の上限を 1.2 pu に、下限を -1 pu と設定している。制限を超えた場合、直接有効電力に影響を及ぼす角周波数を引き上げるあるいは引き下げるよう設計されている。これによって角周波数を調整し、有効電力の出力を制約する効果を得る。

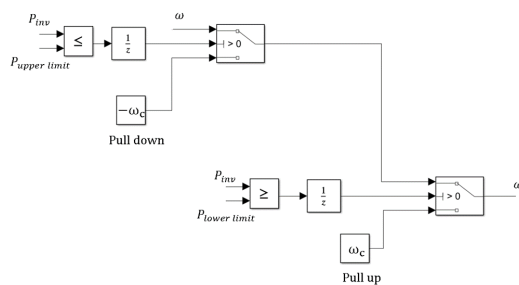


Fig. 2 出力抑制ブロック

4. シミュレーション

Fig. 3 にシミュレーションモデルを示す。このモデルは MATLAB/Simulink で提供される大規模な電力システムにおける地域間振動を調査するモデルであり、長さ 220 km の 2 本の 230 kV 線で連結された 2 つのエリアに 4 台の発電システムを接続している。ここにインバータを並列に接続している。各種パラメータを Table 1 に示す。インバータの容量ごとに慣性定数や制動定数の値を変化させ、適切な機器定数を検討する。

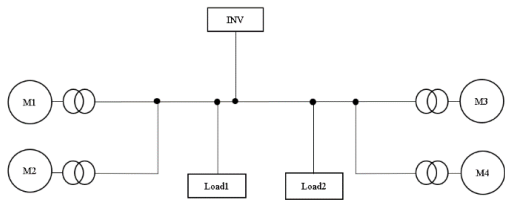


Fig. 3 シミュレーションモデル

Table 1 シミュレーション条件

	M1	M2	M3	M4
発電機運転容量[MVA]	600	200	400	400
インバータ容量[MVA]	800			
定格周波数[Hz]	50			
発電機側電圧[kV]	20			
系統側電圧[kV]	230			
ドループ[%]	5			
慣性定数[s]	2,4,6,8			
制動定数	0.04,0.5,1,5,10,15			

5. 結果

制動定数を固定し、慣性定数を変化させてシミュレーションを行った。制動定数 $K=15$ の時の系統周波数を Fig. 4 に示す。また、系統周波数における Rocof と Nadir を Table 2、Table 3 に示す。

$M=8, K=15$ の時に安定性が良く、 $M=2, K=0.04$ の時に悪い結果となった。Rocof に関して言えばその差は 0.082 程度あり時間窓 10 ms を考慮すれば周波数変動の差は 8.2 Hz/s あることとなる。Nadir の差は 0.23 Hz ほどあり系統安定性に貢献すると考えられる。慣性定数は同期機において電力の変化に対して周波数の変動を抑える効果があり、慣性定数が高いほど効果が現れるのだと考えられる。

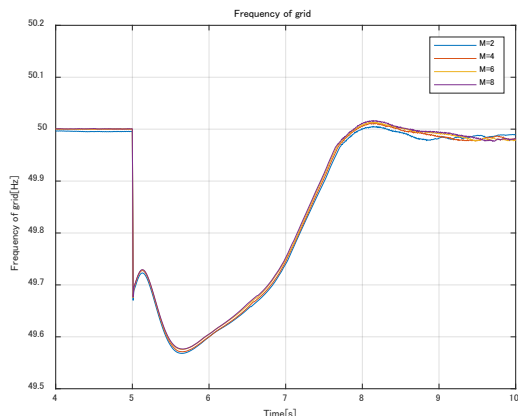


Fig.4 Frequency of grid

Table 2 系統周波数における Rocof

	M=2	M=4	M=6	M=8
K=0.04	-0.574	-0.534	-0.525	-0.528
K=0.5	-0.536	-0.520	-0.518	-0.519
K=1	-0.515	-0.515	-0.516	-0.513
K=5	-0.503	-0.502	-0.499	-0.496
K=10	-0.493	-0.496	-0.499	-0.501
K=15	-0.491	-0.498	-0.501	-0.492

Table 3 系統周波数における Nadir

	M=2	M=4	M=6	M=8
K=0.04	49.354	49.557	49.564	49.569
K=0.5	49.558	49.563	49.570	49.573
K=1	49.568	49.557	49.564	49.569
K=5	49.583	49.585	49.584	49.584
K=10	49.588	49.586	49.584	49.585
K=15	49.586	49.587	49.585	49.587

6. まとめと展望

本稿で検討した容量における慣性定数の違いによる動的安定性への影響について検討した。慣性定数の値が大きいほど周波数変動を抑える効果が確認できた。また、制動定数も大きいほど、周波数変動を抑える効果が確認できた。今後は接続するインバータの容量によって、つまりは容量が大きい場合には制御ゲインを上げ即応性重視させるなど、制御システムを変更する余地について検討する。また、系統内のインバータの容量比を増加させるなど電力システム内の構成を変更して検討を行う予定である。

文献

- (1) 崎元謙一・三浦友史・伊勢敏史：「仮想同期発電機によるインバータ連系分散電源を含む系統の安定化制御」電気学会論文誌 B, Vol132, No.4, pp.341-349(2012)
- (2) 平瀬裕子・阿部一広・杉本和繁・進藤裕司：「代数型仮想発電機モデルによる系統連系インバータ」電気学会論文誌 B, Vol132, No.4, pp.371-380(2012)
- (3) 野呂 康宏：「エネルギー貯蔵で構成される電力システムを可能とするインバータ制御方法の提案」電気学会論文誌 B, Vol138, No.11, pp.854-861(2018)

代表的な研究業績

- (1) Yuki Hayashi, Sandro Sitompul, Goro Fujita 「Virtual Synchronous Generator Control Considering Output Upper Limitation」 ICHVEPS (International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems) 2021 ,pp. 383-386
- (2) 林 勇希, サンドロ シトンプル, 藤田 吾郎 「出力抑制を考慮した仮想同期発電機制御による電力系統の動的安定性への影響」令和 4 年電気学会 B 部門大会 講演番号 116