

IPMSM の V/f 制御における安定化制御の根配置に基づくパラメータ設計法

東井 孝途*, 加藤 尚和, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Parameter Design Considering Root Locus for Damping Control Based on V/f control of IPMSM
Takato Toi, Masakazu Kato, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

埋込磁石形同期電動機(IPMSM)の磁極位置情報を必要としない制御法の一つとして、V/f 制御がある。IPMSM をオープンループの V/f 制御で駆動した場合、原理的に不安定になることがわかっている。そのため、安定化の一手法として、有効電流フィードバックを用いた安定化制御が提案されている⁽¹⁾。従来、安定化制御におけるパラメータは 2 次近似した状態方程式を用いて設計されている⁽²⁾。しかし、安定化ゲインを増加させることで、2 次近似式では無視した根の影響により、制御系が不安定になる。これに対し、著者らは 5 次状態方程式を用いた根配置に基づく安定化制御のパラメータ設計法について提案している⁽³⁾。本論文では、実機検証にてその有用性について確認したため報告する。

2. V/f 制御での安定化制御

図 1 に安定化制御を有する V/f 制御の制御ブロック図を示す。本制御法では、インバータの出力電圧ベクトルの方向を δ 軸、 δ 軸より 90 deg. 遅れた軸を γ 軸とした $\gamma\delta$ 軸直交座標を用いる。IPMSM を単なる V/f 制御で駆動した場合、慣性モーメントと同期インダクタンスの共振により負荷角の持続振動が発生し、高速領域で不安定となる。そこで、有効電流 i_δ を電気角周波数指令 ω^* にフィードバックする安定化制御により、近似的に負荷角のフィードバックを実現し、制御系の安定化を図る⁽¹⁾。

3. 安定化制御のパラメータ

安定化制御において、ハイパスフィルタ (HPF) の時定数 τ と安定化ゲイン K_1 のパラメータを設定する必要がある。時定数 τ に関しては、状態方程式を 2 次近似した際に求められる固有角周波数 ω_n より設計できる。5 次状態方程式より、高速領域かつ無負荷時において、電気時定数が機械時定数よりも十分小さいと仮定したときに求められる 2 次近似式より、固有角周波数 ω_n は(1)式で与えられる。

$$\omega_n = \frac{P_f \psi_m}{\sqrt{JL_q}} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 P_f は極対数、 ψ_m は永久磁石による錯交磁束数、 J はモータの慣性モーメント、 L_q は q 軸インダクタンスであ

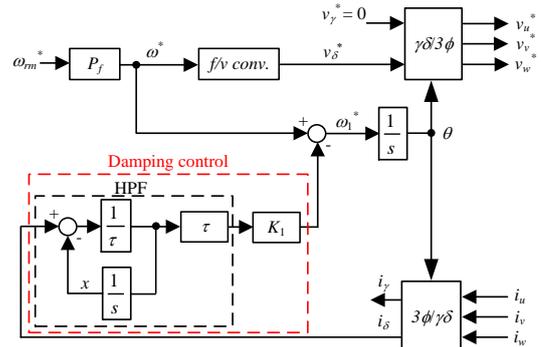


Fig. 1. V/f control based on $\gamma\delta$ -frame with damping control.

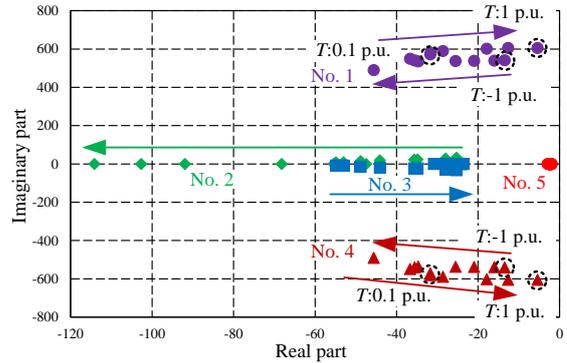


Fig. 2. Root locus when output torque T is varied under rated speed.

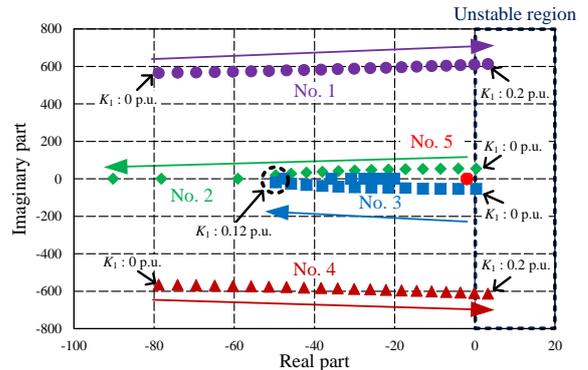


Fig. 3. Root locus when damping gain K_1 is increased under rated speed and rated torque.

る。時定数 τ に関しては、HPF の積分器の出力 x で決まる根配置より決定する。今回は HPF のカットオフ周波数が $\omega_n/20$ となるように時定数 τ を定める。安定化ゲイン K_1 に関しては、根配置および周波数応答より決定する。

図2に定格速度の際に出力トルク T が変化したときの根配置を示す。図より、出力トルク T が大きいほど、No. 1, No. 3, No. 4の根が右半平面に接近することがわかる。そのため、今回は高速領域かつ重負荷領域で安定化ゲイン K_1 を設計する。図3に定格速度かつ定格トルク時に安定化ゲイン K_1 を変化させたときの根配置を示す。安定化ゲイン K_1 が0.2 p.u.以上では、No.1, No.4の根が右半平面に配置されるため、制御系が不安定となる。これらは2次近似式では無視される根である。

今回はモータ速度のオーバーシュートを抑制するため、No. 2, No. 3の根が重根となるように安定化ゲイン K_1 を決定する。

4. 実験結果

<4・1>周波数応答 図4に速度0.9 p.u., 定格トルク出力時、速度指令値に6.5 Hzの正弦波を重畳した際のモータ速度、U相電流波形を示す。図より、 $K_1 = 0.05$ p.u.の場合、モータ速度が振幅0.014 p.u.で振動しているのに対し、 $K_1 = 0.129$ p.u.の場合、0.007 p.u.に振動を抑制できていることがわかる。図5に速度0.9 p.u., 定格トルク出力時に安定化ゲイン K_1 を変化させたときの周波数応答を示す。図より、理論値と実験結果がほぼ一致しているため、導出した5次状態方程式モデルが妥当であるといえる。また、 $K_1 = 0.05$ p.u.の場合、オーバーシュートが発生し、 $K_1 = 0.16$ p.u.では、 $K_1 = 0.129$ p.u.の場合と比較して、通過域が狭くなっていることがわかる。No. 2, No. 3の根が重根となる $K_1 = 0.129$ p.u.の場合、オーバーシュートを抑制でき、通過域がより広くなるがわかる。したがって、この周波数応答より、安定化ゲイン K_1 は0.129 p.u.とする。

<4・2>速度ステップ応答 図6に定格トルク出力時、速度指令値が0.9 p.u.から0.91 p.u.までステップ変化した際のモータ速度、U相電流波形を示す。 $K_1 = 0.01$ p.u.のとき、オーバーシュート量は0.01 p.u.であるが、 $K_1 = 0.1$ p.u.の場合には0.004 p.u.まで減少していることがわかる。

図7に速度0.9 p.u.かつ定格トルク出力時、モータ速度のオーバーシュート量のグラフを示す。図より、安定化ゲイン K_1 を大きくするほど速度指令値ステップ時のオーバーシュート量が小さくなるがわかる。

5. 結論

本論文では、V/f制御における安定化制御のパラメータに関して、5次状態方程式の根配置および周波数応答からHPFのカットオフ周波数および安定化ゲイン K_1 を設計した。その結果、周波数応答より、安定化ゲイン K_1 は原点に近い根が重根になるように設計することで、通過域が広くなり、モータ速度のオーバーシュートを抑制できていることを確認した。今後は運転条件に応じて安定化制御のパラメータをチューニングする方式について検討する予定である。

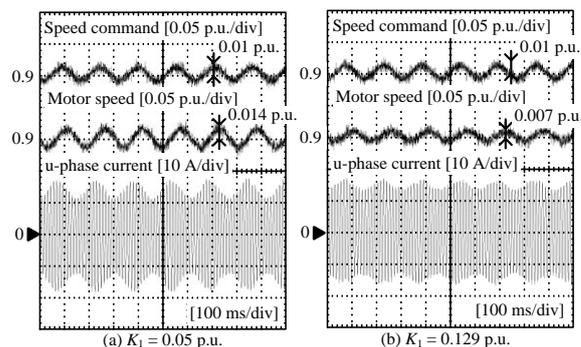


Fig. 4. Sinusoidal response of motor speed under 0.9 p.u. of rated speed and 1 p.u. of rated torque.

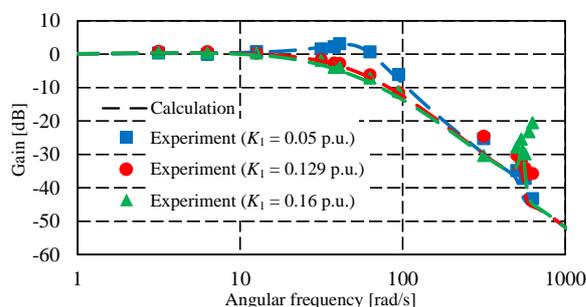


Fig. 5. Frequency characteristics of speed command to motor speed under 0.9 p.u. of rated speed and 1 p.u. of rated torque.

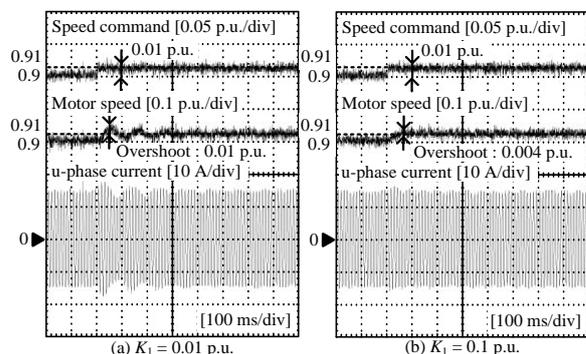


Fig. 6. Step response of motor speed under 0.9 p.u. of rated speed and 1 p.u. of rated torque.

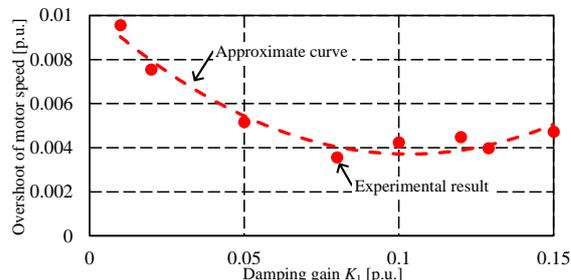


Fig. 7. Overshoot of motor speed when damping gain K_1 is varied under 0.9 p.u. of rated speed and 1 p.u. of rated torque.

文献

- (1) 伊東・豊崎・大沢：電学論 D, Vol. 122, No. 3, pp. 253-259 (2002)
- (2) 木内・大西：電学論 D, Vol.130, No1, pp.93-101 (2010)
- (3) 東井・加藤・伊東：関西支部連合大会, G4-22 (2016)