

DC バスに複数台接続されたサーボドライブシステムの安定解析

◎三浦 克樹, 渡辺 大貴, 日下 佳祐, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

1. はじめに

直流給電サーボドライブシステムでは配線インピーダンス(Z)と負荷側の制御系が干渉し、システムが不安定化する問題がある⁽¹⁾。複数の負荷を DC バスに接続した際の安定判別法は既に提案されているが⁽²⁾、負荷の動作点とバスの配線 Z および直流部のキャパシタがシステムの安定性に与える影響は明確になっていない。

本論文では、共通バスまでの配線 Z が各インバータの配線 Z より比較的大きい条件において、バスまでの Z と動作点の関係を明確にする簡易な手法を提案し妥当性を確認したので報告する。

2. システム構成と状態方程式

図1に負荷としてサーボが2台接続された直流給電システムを示す。ここで L_{bus} , R_{bus} は DC バスの配線インダクタンスと配線抵抗, L_{b1} , L_{b2} , R_{b1} , R_{b2} は DC バスからインバータまでの配線インダクタンスと配線抵抗を示している。動作点近傍で線形近似を行うと、このシステムは8次の状態方程式で表される。DC バスから系#1 に流入する電流の微小変化分 Δi_{b1} の状態方程式を抜き出すと(1)式で表される。

$$\frac{d\Delta i_{b1}}{dt} = A_{11}\Delta i_{b1} + A_{12}\Delta v_{b1} + A_{15}\Delta i_{b2} + A_{16}\Delta v_{b2} + b_{11}\Delta v_{dc} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, A_{11} , A_{12} , A_{15} , A_{16} , b_{11} はシステム行列の要素, b_{11} は入力係数行列の要素を示す。(1)式より, 系#1 の状態方程式には他方の系の状態変数 Δi_{b2} と Δv_{b2} が含まれており, かつ各項の A_{11} , A_{12} , A_{15} , A_{16} , b_{11} には他の系のパラメータ (L_{b2} , R_{b2}) が含まれている。よって本システムは複数の系が干渉するシステムであることがわかる。

3. 電源から共通バスへの配線長の影響を考慮した解析法

図2に DC バスの配線長を考慮した等価 Z モデルを示す。今回は実際の構成に基づき, L_{bus} , R_{bus} が L_{b1} , L_{b2} , R_{b1} , R_{b2} より十分大きい場合を検討する。なお, L_{bus} , R_{bus} が十分に小さい時は相互に干渉がなくなるので, 個別に安定判別すればいい。ここで $Y_{in1}(j\omega)$, $Y_{in2}(j\omega)$ はそれぞれの系のサーボの入力ドミナタンス(Y)である。図2において, A-A'間から見た LC フィルタの出力 Z と負荷側 Y の積 $T_{MLG}(j\omega)$ からナイキストの安定判別法を用いて安定判別する。このとき $T_{MLG}(j\omega)$ の虚部がゼロになる角周波数 ω_b において実部が -1 より大きいと安定となるが, ω_b の導出は複雑であり困難である。そこで, LC フィルタの共振周波数 ω_{res} を用いた安定判別法を提案する。(2)式に LC フィルタの共振角周波数を示す。

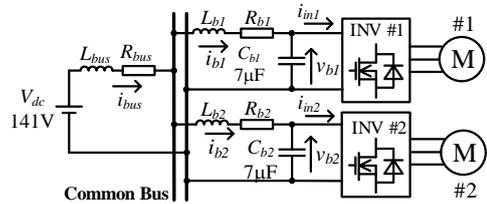
$$\omega_{res} = \sqrt{1/L_{bus}(C_{b1} + C_{b2})} \dots\dots\dots (2)$$

$\text{Re}\{T_{MLG}(j\omega)\}$ に ω_{res} を代入することで, (3)式の安定条件式が得られる。

$$\text{Re}\{Y_{in1}(j\omega_{res})\} + \text{Re}\{Y_{in2}(j\omega_{res})\} > -\frac{(C_{b1} + C_{b2})R_{bus}}{L_{bus}} \dots\dots\dots (3)$$

図3に, モータの回転速度を変化させた時のモータ出力 P_{out} とモータ側入力 Y の実部 $\text{Re}\{Y_{in}(j\omega_{res})\}$ の関係を示す。モータ出力に対して $\text{Re}\{Y_{in}(j\omega_{res})\}$ は概ね線形的に減少することがわかる。高速域では無負荷時の $\text{Re}\{Y_{in}(j\omega_{res})\}$ が増加するため(3)式を満足し, 安定領域が拡大する。

図4に安定限界となる各モータ軸出力の関係を示す。一方のモータの出力によって, もう一方の安定動作できる軸出力範囲が変化している。システム行列の固有値から調べた安定限界と, (3)式を用いて算出した結果は4%以内で一



State variables: Δi_{b1} , Δv_{b1} , Δi_{in1} , Δv_{in1} , Δi_{b2} , Δv_{b2} , Δi_{in2} , Δv_{in2}
 Δv_{ii1} , Δv_{ii2} : Integrator of PI controller (ACR)

Fig. 1 Servo drive system connected to DC bus.

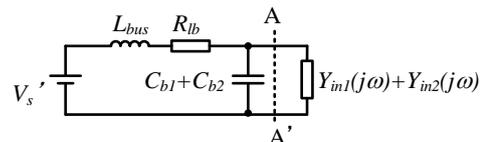


Fig. 2 Equivalent impedance model. ($L_{bus} \gg L_{b1}, L_{b2}$)

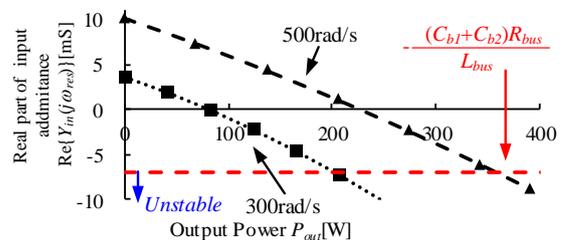


Fig. 3 Relationship between output power and real part of servo input admittance.

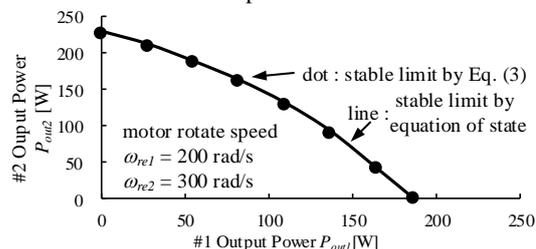


Fig. 4 Relationship of both servo output power at stable limit. ($L_{bus} = 1\text{mH}$, $R_{bus} = 0.5\Omega$)

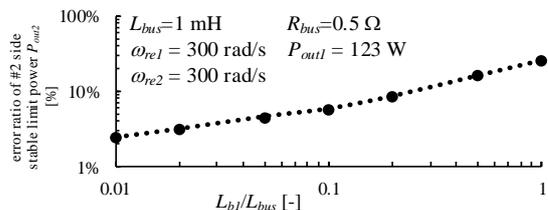


Fig. 5 Relationship between L_{b1}/L_{bus} and stability criterion error ratio.

致している。誤差は ω_b の代わりに LC フィルタの共振角周波数を用いた時に生じる, $T_{MLG}(j\omega)$ の誤差による。

図5に#1側出力一定時の, L_{bus} に対する L_{b1} , L_{b2} の比と, 状態方程式と判別式から算出した#2側モータ出力の安定限界の誤差率の関係を示す。今回は $L_{b1} = L_{b2}$, $R_{b1} = R_{b2}$ としており, L_{b1}/R_{b1} が一定になるよう R_{b1} も変化させている。この結果より, 提案法では L_{b1} が L_{bus} の 1/10 以下であれば, 7%以内の精度で安定判別できることが明らかとなった。

今後は3台以上への拡張と実機試験を予定している。

参考文献

- (1) 財津, 2021 電気学会 D 部門大会, No. IV, pp. 13-16
- (2) 桐淵 他, 電学論 D, Vol. 140, No. 3, pp. 184-193(2020)