

発電機軸共振のモード解析

E95009 上野保裕

指導教員 藤田吾郎

1. 研究背景

軸ねじれ共振現象 (SSR: SubSynchronous Resonance) ^{[1][2]} による最初の事故が 1970, 1971 年アメリカの Mohave 発電所にて発生した。周知の通り発電機は機械的エネルギーを電気的エネルギーに変換するものであり、電気を発生する電気回路部分と発電機の回転子に回転力を与える回転機械部分で構成されている。また回転機械部分は回転子と外部駆動機関とをつなぐ軸から構成されている。一般に発電機の回転子と外部駆動機関の慣性は異なるので、外乱発生時には両者の回転速度に差が生じ、軸ねじれ振動現象が発生する。通常、回転機械部分には機械的な損失があるため、軸ねじれ振動は時間とともに減衰するが、ある条件が成立すると軸ねじれ振動が持続、あるいは拡大する場合がある。これは軸ねじれ共振現象と呼ばれ、主に直列コンデンサ補償適用系統や直流送電システム適用系統で発生し得る現象である。

日本での直列コンデンサ補償適用系統は、関西電力の 275kV 大黒部幹線と九州電力の 1 例の計 2 例のみで、大半は並列コンデンサ補償が用いられている。しかし、今後電力需要増加に伴う系統補償の増加により、並列コンデンサ補償系統でも SSR の発生が懸念される。最近ではサイリスタ制御直列コンデンサ(TCSC)を用いて SSR を回避させる方法も検討されている^[3]が、並列コンデンサ補償適用系統における SSR の可能性については検討がまだなされていない。

2. 解析手法 ^[1]

発電機のモデルとして図 1 に示した 6 質点ばね系を用いた。また、IEEE が推奨する SSR 研究のベンチマークモデル^[4]を図 2 に示す。発電機はコンデンサ補償系統に接続され、左側から変圧器、ブロッキングフィルタ、線路インピーダンス、ギャップによる保護装置付きのコンデンサ、そして無限大母線となっている。また 2 つの地絡リアクタンス x_F が異なった場所にあり、地絡事故を A が B のどちらかに想定できる。

先にも述べたように SSR の発生メカニズムの解析は、機械的要素と電気的要素が影響する。ここで機械的要素をモデル化したブロック線図を図 3 に示す。両要素をモデル化した 27 次の行列が基本的な解析システムである。

まず固有値を計算することにより安定判別を行う。そして、この時系統の補償率を変化させ、

同様に安定判別を行う。また、電力系統安定化装置 PSS (Power System Stabilizer) を用いた場合の安定判別も同時に行う。一方、過渡応答の解析として、一定時間外乱が加わった際の応答結果を求める。図 4 に応答例を示す。

3. モード解析

標準形の状態方程式で表される状態ベクトル $x(t)$ は、その係数行列 A の固有値 $\{\lambda_i\}$ と固有ベクトル $\{v_i\}$ から決まる状態ベクトル $x^*(t)$ 、そして変換行列 T^{-1} によって決定される。状態ベクトル $x^*(t)$ は状態方程式のモード領域の解と呼ばれ、それを構成する個々の要素 $e^{i t}$ は状態ベクトル $x(t)$ のモード、あるいは基底関数と呼ばれる。 n 次系の状態変数応答は n 個のモードにより支配される。

モードとは、ねじれ振動の数であり、今回用いた 6 質点ばね系モデルの場合、モードの数は 6 個存在する。図 5 のモード解析結果は、6 質点ばね系にある高圧、中圧、2 基の低圧タービン、発電機、励磁機各々の固有ベクトルの構成要素中、最も大きい構成要素を 1 として標準化し、固有ベクトルの 6 つのモード形状を示している。

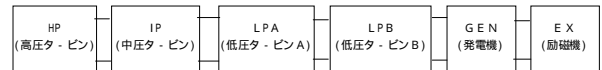


図 1 6 質点ばね系モデル

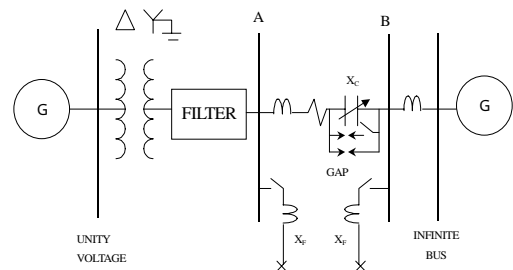


図 2 IEEE ベンチマークモデル

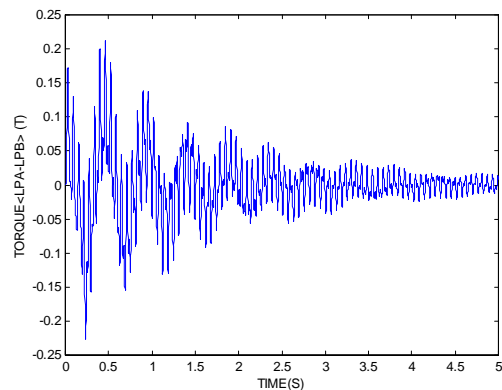


図4 タービントルクの例(LPA-LPB)

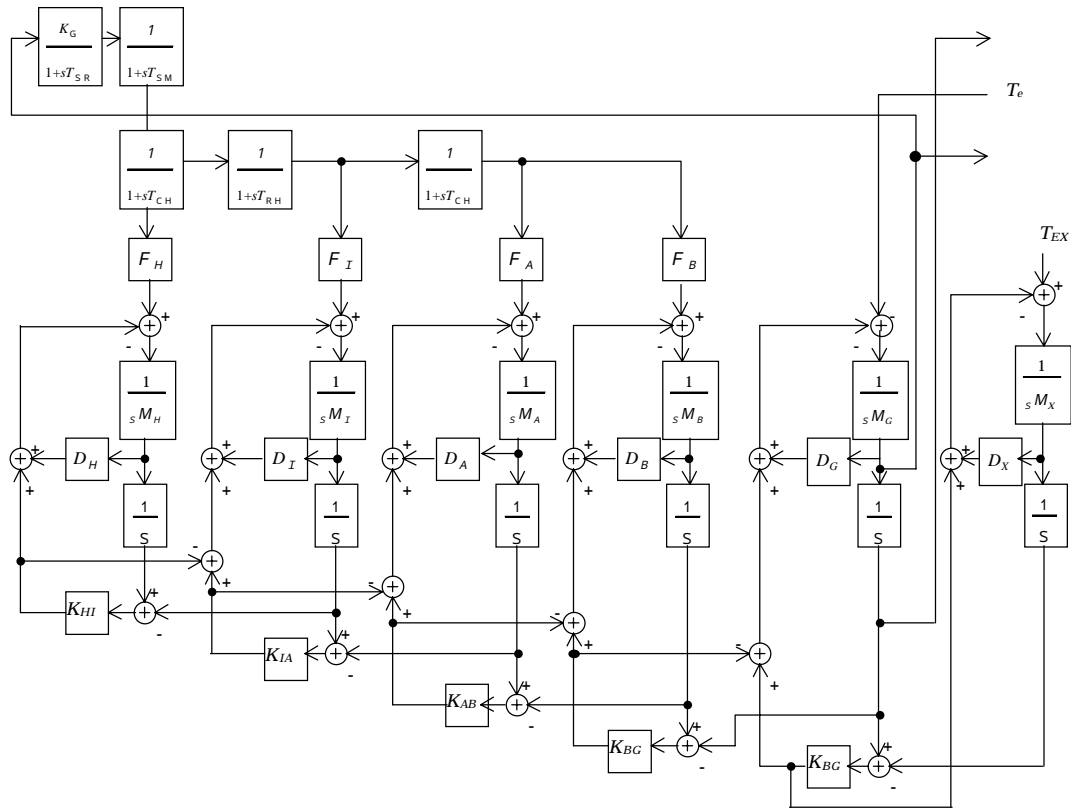


図3 機械的部分のブロック線図

ねじれの数(図5)を見ると分かるように符号の変化から読み取ることができる。例えばモード0の場合は符号の変化が観測されていない。つまり質点の軸上にねじれがない状態で回転している。またモード4においては符号の変化が4回観測され、質点の軸上高圧タービンと中圧タービンA間、中圧タービンAと中圧タービンB間、中圧タービンBと発電機間、そして発電機と励磁機間の合計4ヶ所にねじれがある状態で回転していることがわかる。

4. まとめ

固有値による安定判別により、システムの補償率を高めると不安定になることがわかった。またPSSを用いることで安定性を向上できることが確認できた。モード解析により、どのタービン間にねじれが発生しているのかを判別できる。

5. 参考文献

[1] Y. N. Yu, "Electric Power Dynamics", Academic Press Inc., London, 1983
 [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
 [3] 小林直樹・原築志・田能村頭一・小柳薫・武井明久:「軸ねじれ振動対策を考慮した直列コンデンサのオンオフ離散制御」, 電気学会論文誌(B), Vol.117, No.7, (1997-7)
 [4] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force of the Dynamic System Performance Working Group Power System Engineering Committee, "First Benchmark Model for Computer Simulation of

Subsynchronous Resonance", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-96, No. 5, September/October 1977

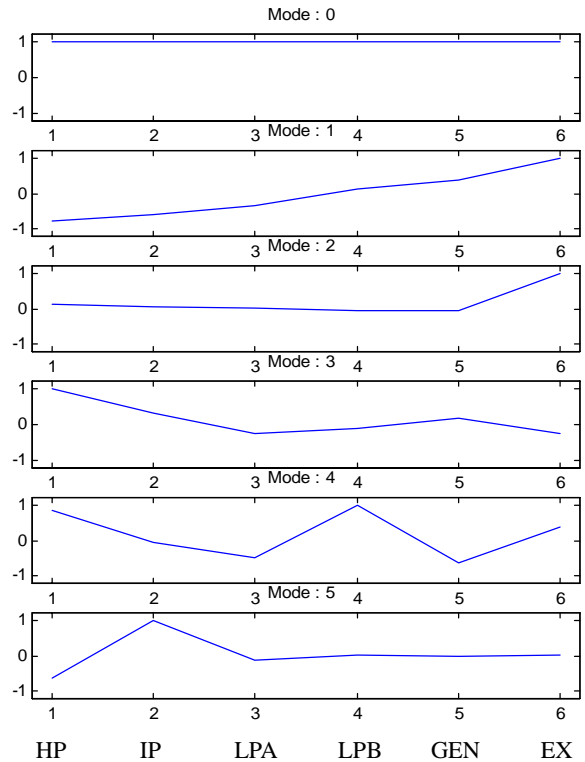


図5 モード解析結果