

タービン・発電機における高速度再閉路時の軸ねじれ現象解析

(Analysis for shaft torsional phenomenon of turbine and generator at high speed reclosing)

園 博昭*¹・野村 毅*¹・山田 順弘*¹
(H.Sono) (T.Nomura) (N.Yamada)

北川 晴也*²
(H.Kitagawa)

タービン・発電機の軸系において、高速度再閉路失敗時に大きな軸ねじれ振動が発生し、軸の機械的強度を超えるおそれがある。回転座標系から見た運動方程式と、 $Xd' - Xq$ モデルに基づく発電機有効電力表現をダイレクトに結び付けた独自モデルを構築し、本現象の解析を行った。

1. はじめに

タービン・発電機の軸系において、高速度再閉路失敗時に大きな軸ねじれ振動が発生し、軸の機械的強度を超えるおそれがあることが知られている。⁽¹⁾ 当社の供給エリアである北陸地域は、冬季雷の発生頻度が多く、しかも冬季雷は多相に及ぶ過酷事故が多いという特徴がある。そのため軸ねじれ現象は、高速度再閉路の運用も絡めた喫緊のテーマとなっている。

しかし、軸ねじれ現象は「電気系に外乱が加わったときに、機械系が如何に推移するか」という機械工学と電気工学の境界問題であるため、機械技術者と電気技術者の分業が主流となっている現状において、非常に扱いづらいテーマの一つであり現象全体のイメージを捉えることすら困難であった。昨年7月以降、当社の火力保守技術研修センター内に技術解析グループを発足させて機械技術者と電気技術者数名を参集し、まず最初のテーマとして軸ねじれ現象の解析に取り組んだ。独自モデル構築などの成果が得られたので、その内容について紹介する。

2. 軸ねじれ現象の概説

軸に生じる変形（ねじれ角）と内力（モーメント）の間には比例関係があり、次式で表される。

$$T = k \cdot \theta$$

T : モーメント [N・m]

k : ばね定数 [N・m²/rad]

θ : ねじれ角 [rad/m]

この比例関係は、コイルばねにおける変形（伸び）と内力（力）の関係と同等であり、軸ねじれとコイルばねを類推的に考えることができる。

タービン・発電機軸系に、高速度再閉路失敗（故障継続）が起きた場合、図1の如くタイミングが悪いと過大な軸ねじれに至る可能性がある。高速度再閉路に伴う有効電力の喪失・印加を、軸系にとっての外力および釣合点の突変として扱う。

ここで「タイミングが悪い」という表現は、高速度再閉路にはリレー動作のばらつき、および遮断器動作のばらつきが不可避であることによる。1回目の故障除去時、無電圧時間を経過した後の再閉路時、そして再閉路失敗

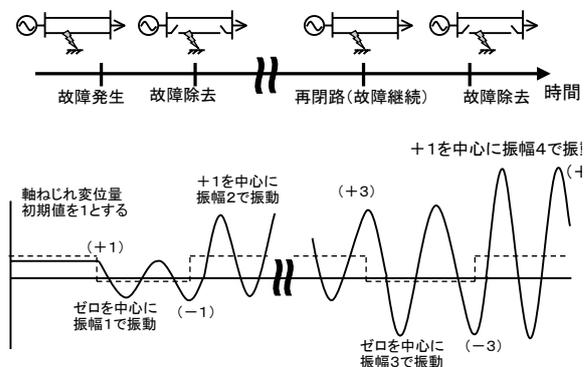


図1 高速度再閉路失敗時の軸ねじれ様相

*¹ 北陸電力（株）
(Hokuriku Electric Power Company)

*² (財) 電力中央研究所 出向
(Central Research Institute of Electric Power Industry)

原稿受付年月日 平成17年9月16日

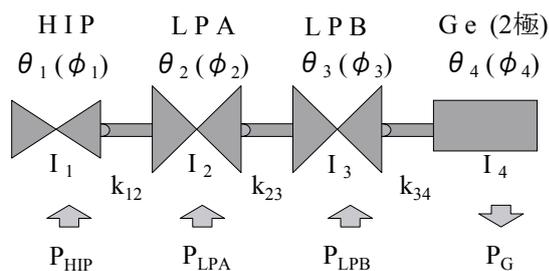


図2 タービン発電機 軸構成

に伴う2回目の故障除去時、いずれも時間的なばらつきが生じる。ばらつきの大きさは、商用周波数の1～2サイクル程度である。

図1において、有効電力の経時的推移や、複数軸構成などは考慮されていない。そこで、複数軸を表現し、かつ経時的に諸量を算出できるような新しいモデルの構築が、現象解析を行うにあたっての必須条件となる。

3. 解析フロー

3.1 運動方程式

図2のような4軸2極のタービン発電機軸系について考える。これは、当社汽力タービンの標準的な軸構成である。

このとき、次の運動方程式が成り立つ。

$$I_1 d^2 \theta_1 / dt^2 + k_{12} (\theta_1 - \theta_2) = P_{HIP} / (d \theta_1 / dt) \quad \text{——(a)}$$

$$I_2 d^2 \theta_2 / dt^2 + k_{12} (\theta_2 - \theta_1) + k_{23} (\theta_2 - \theta_3) = P_{LPA} / (d \theta_2 / dt) \quad \text{——(b)}$$

$$I_3 d^2 \theta_3 / dt^2 + k_{23} (\theta_3 - \theta_2) + k_{34} (\theta_3 - \theta_4) = P_{LPB} / (d \theta_3 / dt) \quad \text{——(c)}$$

$$I_4 d^2 \theta_4 / dt^2 + k_{34} (\theta_4 - \theta_3) = -P_G / (d \theta_4 / dt) \quad \text{——(d)}$$

I_1 : HIP (高中圧) ロータ慣性モーメント [kg・m²]

I_2 : LPA (低圧A) ロータ慣性モーメント [kg・m²]

I_3 : LPB (低圧B) ロータ慣性モーメント [kg・m²]

I_4 : Ge (発電機) ロータ慣性モーメント [kg・m²]

θ_1 : HIP ロータ角度 [rad]

θ_2 : LPA ロータ角度 [rad]

θ_3 : LPB ロータ角度 [rad]

θ_4 : Ge ロータ角度 [rad]

k_{12} : HIP - LPA間 ばね定数 [N・m / rad]

k_{23} : LPA - LPB間 ばね定数 [N・m / rad]

k_{34} : LPB - Ge 間 ばね定数 [N・m / rad]

P_{HIP} : HIP ロータ軸入力 [W]

P_{LPA} : LPA ロータ軸入力 [W]

P_{LPB} : LPB ロータ軸入力 [W]

P_G : 発電機有効電力 [W]

軸ねじれは軸ジャーナル部に集中的に発生しているとみなす。例えば HIP - LPA間の軸ねじれは、 $\theta_1 - \theta_2$ で表される。 $\theta_1 \sim \theta_4$ の基準点は任意でよい。

$I_1 \sim I_4$, $k_{12} \sim k_{34}$ は機械的定数であり、軸設計諸元として既知である。ただし $k_{12} \sim k_{34}$ については、比ねじれ角ではなく単純な角度に対する比例係数として考慮するので、通常のばね定数とは単位が異なることに注意が必要である。

$P_{HIP} \sim P_{LPB}$ は、事故から1～2秒程度の過渡領域において、一定値とみなす。その値は熱平衡線図あるいは運転データから決定する。 P_G については後述する。

例えば(b)式において、左辺第1項 $I_2 d^2 \theta_2 / dt^2$ は慣性を、左辺第2項 $k_{12} (\theta_2 - \theta_1)$ はHIP - LPA間で θ_2 が増加する向きの内力を、左辺第3項 $k_{23} (\theta_2 - \theta_3)$ はLPA - LPB間で θ_2 が増加する向きの内力を表す。それらの和が、外力(トルク = 軸出力 / 角速度)と等しいことになる。

また、(d)式の右辺にマイナス符号が付くのは、発電機有効電力は軸系にとってブレーキの役割だからである。

次に、(a)～(d)式に対し、 $\theta_i = \omega_N t + \phi_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$)なる変数変換をほどこす。 ω_N は定格角速度 [rad/s]である。この変数変換により、静止座標系からみた角度 θ_i から、定格(同期)角速度 ω_N で回転する座標系からみた角度 ϕ_i に変換されることになる。すると次の式が得られる。

$$I_1 d^2 \phi_1 / dt^2 + k_{12} (\phi_1 - \phi_2) = P_{HIP} / (\omega_N + d \phi_1 / dt) \quad \text{——(a)'}$$

$$I_2 d^2 \phi_2 / dt^2 + k_{12} (\phi_2 - \phi_1) + k_{23} (\phi_2 - \phi_3) = P_{LPA} / (\omega_N + d \phi_2 / dt) \quad \text{——(b)'}$$

$$I_3 d^2 \phi_3 / dt^2 + k_{23} (\phi_3 - \phi_2) + k_{34} (\phi_3 - \phi_4) = P_{LPB} / (\omega_N + d \phi_3 / dt) \quad \text{——(c)'}$$

$$I_4 d^2 \phi_4 / dt^2 + k_{34} (\phi_4 - \phi_3) = -P_G / (\omega_N + d \phi_4 / dt) \quad \text{——(d)'}$$

以降は、この ϕ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) で表した運動

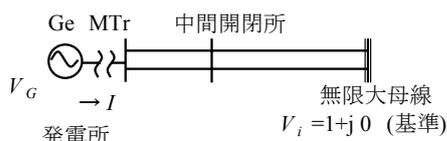


図3 系統構成

方程式を扱う。例えば HIP-LPA間の軸ねじれは、 $\phi_1 - \phi_2$ で表されることを指摘しておく。なお、 ϕ_i ($i = 1, 2, 3, 4$)の基準については後述する。

3.2 発電機有効電力

図3のような1機無限大母線で考える。 V_G は発電機端子電圧、 I は発電機電流、 V_i は無限大母線電圧である。なお、この3.2節において、特記無き場合は全て単位法で表されているものとする。

(d), (d)' 式右辺の発電機有効電力 P_G を次式で表現する。

$$P_G = C \times \text{func-P}_G(\phi_4, X_e)$$

——(e)

func-P_G は ϕ_4 と X_e を変数とする関数であり、同期発電機の過渡突極性を考慮した $X_d' - X_q$ モデルにより図4の如くベクトル計算により算出する。図4における各記号の意味は次のとおりである。なお、斜体はベクトル量であり、非斜体字はスカラー量である。 I^* はベクトル I の複素共役を表す。 α は説明の便宜上で用いた角度である。

X_d' : 直軸過渡リアクタンス

X_q : 横軸同期リアクタンス

$E'q$: X_d' 背後横軸電圧

I_d : 直軸電流

I_q : 横軸電流

δ : 発電機内部相差角 [rad]

δ_i : 発電機横軸と無限大母線との電圧相差角 [rad]

ϕ_4 は発電機ロータ、すなわち界磁の位置を表す。ここで ϕ_i ($i = 1, 2, 3, 4$)の基準を、無限大母線電圧とすることで、 ϕ_4 は発電機横軸と無限大母線との電圧相差角 δ_i を表すことになる。

図4において界磁保存性により X_d' 背後の横軸電圧 $E'q$ を一定とみなし、 $E'q, V_i, \phi_4$ の3変数を指定して状態を一意に決める。このうち ϕ_4 は、3.1節の運動方程式を経時的に数値求解していく過程で得られる。

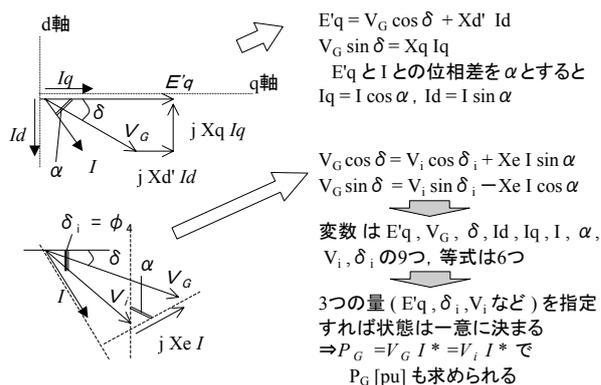


図4 電気諸量のベクトル計算

C は送電状態に応じた係数(通常 $C = 1$)であり、1相事故中または開放中は $C = 2/3$ 、2相事故中または開放中は $C = 1/3$ 、3相事故中または開放中 $C = 0$ とする。

X_e は外部リアクタンスであり、事故除去時に1回線送電となるケースを、当該送電線のリアクタンスを2倍にすることで表現する。

ここで特筆すべきは、 ϕ_4 を介して、運動方程式と発電機有効電力表現が直接結び付けられていることである。この両者を一体に考えて、今回の独自モデルと称している。

また、軸系の運動方程式には発電機有効電力しか必要としないことから、無効電力計算すなわち短絡電流計算を省略できることも重要である。

3.3 数値シミュレーション

独自モデルの構築により、問題は連立2階常微分方程式の数値求解に帰結される。シミュレーションツールとしては、数値および数式計算用ソフトMaTX(古賀雅伸氏)⁽²⁾をベースに用いて、エクセル(Microsoft Corporation)により比較検証を行った。エクセルについては、別途に新規開発した終期速度代表法のアルゴリズムを採用した。

時間的なばらつきは、モンテカルロ法、すなわち乱数処理にて表現した。試行回数は5,000~10,000回程度で収束した。

3.4 機械的強度の評価

機械形状を勘案し、軸ジャーナル、カップリングボルト、キー(HIP-CP用)の3つを考慮する。(図5参照)

軸ジャーナルおよびカップリングボルトについては、それぞれのせん断降伏応力から許容軸ねじれを算出する。

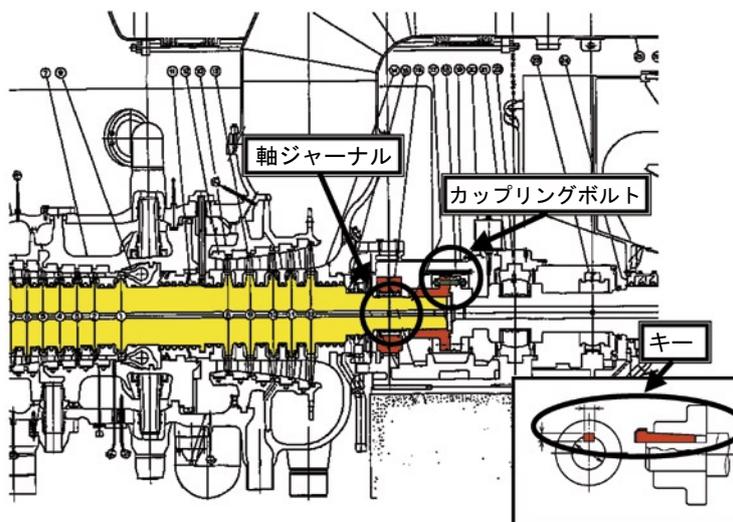


図5 タービン断面図

キーについては、キーのせん断降伏応力に加え、面圧による伝達可能トルクを織り込む。面圧は、材料力学の組合わせ円筒の式と厚肉回転円筒の式の連立解から算出する。面圧に摩擦係数を乗じたものが面圧による伝達可能トルクとなる。

これら3つのうち、最も弱点となる部位について独自モデルから得られる発生最大軸ねじれと比較し評価する。

4. 解析事例

4.1 モデルプラントの解析事例

モデルプラントの解析事例を以下に示す。モデルプラントは実機ベースで諸定数を定め、更に実機で想定しうるばらつきの範囲を定めてモンテカルロ法を用いた。事故様相については過酷事故の典型である3相3線事故→3相3線事故という高速度再閉路失敗ケースについて解析した。計算は独自モデルの限界（界磁保存性、 X_d' の有効性、ロータ軸入力一定）である約2秒で打ち切った。

モンテカルロ法によりばらつきを変えたとき、軸ねじれ（LPA-LPB間）が最大・最小となるケースについて、図6は発電機有効電力を、図7は軸ねじれ（LPA-LPB間）を示したものである。両図において、細線は軸ねじれ（LPA-LPB間）が最大となるばらつきケース、太線は軸ねじれ（LPA-LPB間）が最小となるばらつきケースを表す。両者の差異は遮断器開放仕上がりで商用周波数の約1サイクル（整定4サイクル）、無電圧仕上がりで約2サイクル（整定54サイクル）といった、わずかな違いである。

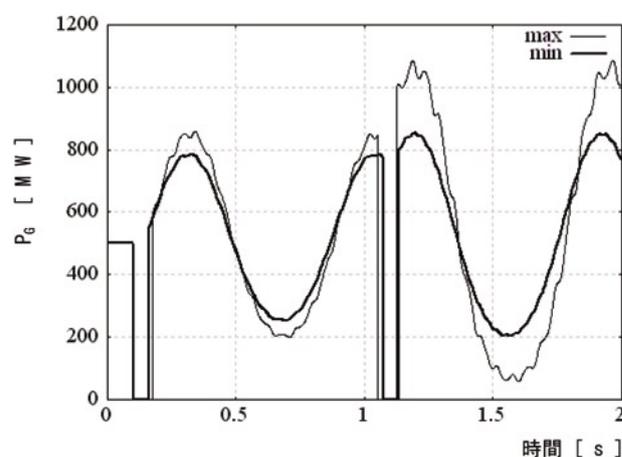


図6 解析事例（発電機有効電力）

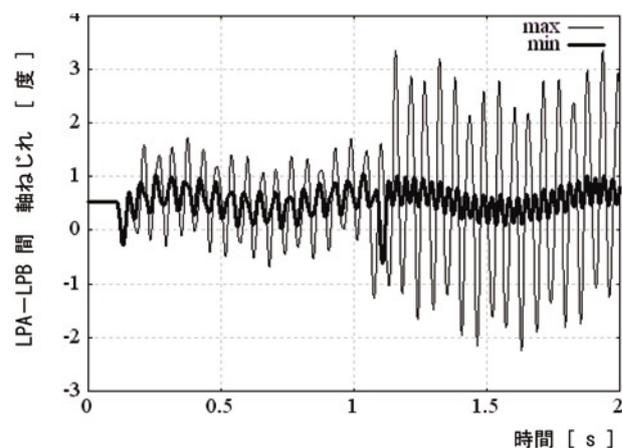


図7 解析事例（LPA-LPB間 軸ねじれ）

このわずかなばらつきの違いにより、発電機有効電力はそれほど変わらない（図6）が、軸ねじれの様相が大きく異なる（図7）ことがわかる。最大ケースにおける発生最大軸ねじれは 3.35° である。別途に機械的強度

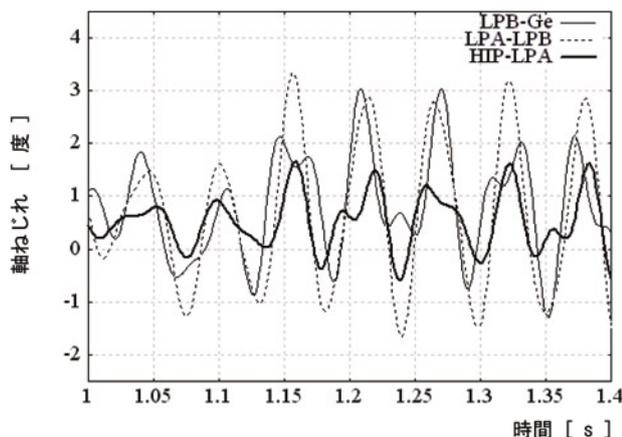


図8 解析事例（最大ケース）

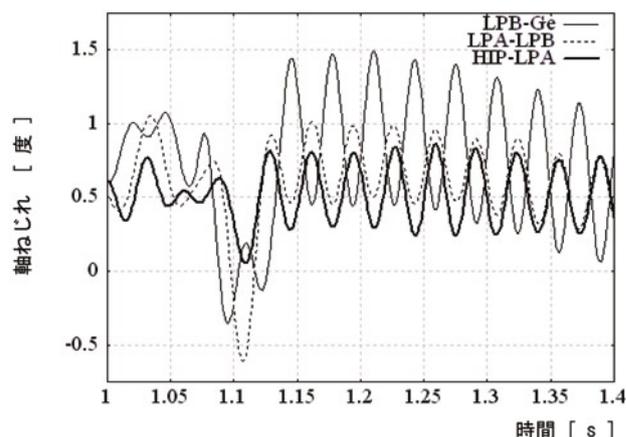


図9 解析事例（最小ケース）

（軸ジャーナルが最弱点）から許容軸ねじれを求めると 4.2° であり、その約80%に達することになる。

4.2 固有モード

前節と同じモデルプラント解析結果について、見方を変えてみる。

図8は最大ケースにおける各軸のねじれを同一グラフ上に表したものである。太実線はHIP-LPA間、細破線はLPA-LPB間、細実線はLPB-Ge間の軸ねじれを表している。

図8において、時間1.15s近辺に着目すると、軸ねじれ比はLPA-LPB間（細破線）を1.0として

$HIP-LPA : LPA-LPB : LPB-Ge = 0.36 : 1.0 : 0.62$ となっている。また、時間1.15s~1.35sの区間の波数は約3.5波であり、周波数17.5Hzに相当する。

この軸系の固有モードは3.1節 式(a)~(d)の右辺をゼロとし、 $\theta_i = A_i \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \beta)$ ($i = 1, 2, 3, 4$) なる形の解を仮定することにより得られ、本モデルプラントにおいては表1のような固有周波数・軸ねじれとなる。表1の1次モードの値は、前述の図8における軸ねじれ比・周波数とほぼ一致している。つまり、最大ケースは軸ねじれ、周波数共に固有1次モードが出現していることがわかる。

図9は最小ケースにおける各軸のねじれを同一グラフ上に表したものであり、線種は図8と同様である。

図9において、時間1.15s近辺に着目すると、軸ねじれ比はLPA-LPB間（細破線）を0.90として

$HIP-LPA : LPA-LPB : LPB-Ge = 0.90 : 0.90 : -1.8$ となっている。また、時間1.15s~1.35sの区間の波数は約6.0波であり、周波数30.0Hzに相当する。これは表1の2次モードの値とほぼ一致しており、最小ケースでは軸ねじれ、周波数共に固有2次モードが出現していることがわかる。

表1において各軸ねじれの正負に着目すると、1次モードでは全て同相、2次モードではLPB-Ge間とその他が逆相となっている。コイルばねとの類推で表現すれば図10のようなイメージになり、1次モードが最大ケース、2次モードが最小ケースとなることが定性的に理解できる。

4.3 定量的評価

図11に、系統過渡安定度シミュレーションソフトとして国内で標準的に用いられているY法（電力中央研究所）⁽³⁾との比較データを示す。

太線が独自モデル、細線がY法による有効電力カーブである。両者のタイミング（ばらつき）は同じ値として

表1 固有周波数、軸ねじれ

固有モード	固有周波数[Hz]	軸ねじれ比(HIP振幅を1とする)		
		HIP-LPA間	LPA-LPB間	LPB-Ge間
1次	17.9	0.32	1.00	0.59
2次	30.7	0.96	0.89	-1.77
3次	36.4	1.35	-0.53	0.29

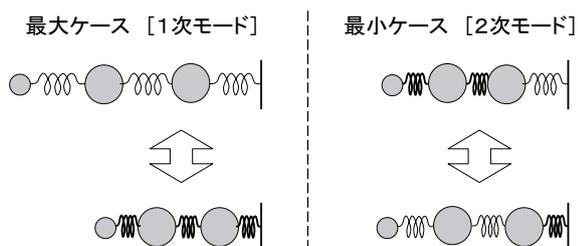


図10 固有モード イメージ

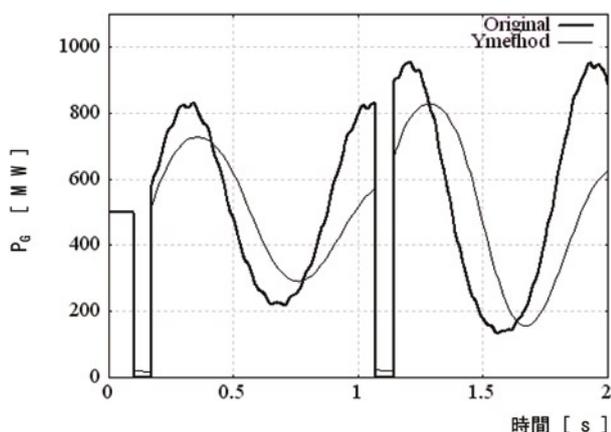


図11 解析事例 (手法対比)

いるが、主にY法の刻み時間の制約により、独自モデルによる最大・最小ケースとは一致しない。

なお、独自モデルが1機無限大母線系統を扱うのに対し、Y法では実機に基づく多機系統を扱っており、必ずしも同等の条件ではない。

図11から、ほぼ同じ波形が得られているが、全般的に独自モデルの方が有効電力動揺が大きくなる。軸ねじれ現象においては、有効電力の動揺が大きいほど軸ねじれの仕上がりも大きくなる傾向があるため、1機無限大母線系統（並列発電機による同期化力を考慮しない）を扱う独自モデルによる解析は、結果がシビアサイドになりやすいことになる。

5. むすび

以上をまとめると、次のとおりである。

- ・運動方程式と発電機有効電力表現を直接結び付けた独自モデルを構築した。
- ・運動方程式は、変数変換により回転座標系から見た形で扱う。
- ・発電機有効電力表現は、 $X_d' - X_q$ モデルを採用し、 X_d' 背後の横軸電圧 E'_{q} を一定として扱う。
- ・独自モデルの構築により、問題は連立2階常微分方程式の数値求解に帰結される。
- ・機械的強度について、弱点部位を特定し、かつ許容軸ねじれの算出法を明らかにした。
- ・モデルプラントの解析事例により、独自モデルによって軸ねじれの時間的変化を定量的に把握できることを確認した。
- ・モデルプラントの解析事例において、固有モードの影響が強く表れていることを確認した。
- ・モデルプラントの解析事例において、Y法との比較により、有効電力動揺については、ほぼ同じ波形が得られることを確認した。

最後に、今回の独自モデルは比較的簡易なものであることから、広く現場技術者間で用いられ、軸ねじれ現象の理解・評価に役立てられることを期待する。

以上

参考文献

- (1) 萩本他：再開路時のタービン・発電機に及ぼす影響，東芝レビュー Vol. 31 No. 9, 1976
- (2) 古賀他：数値処理と数式処理を融合した制御系CAD言語MaTX，計測自動制御学会論文集 Vol. 29 No. 10, 1993
- (3) 谷口他：大規模電力系統の安定度総合解析システムの開発，電力中央研究所報告 T14, 1990