

軸ねじれ振動抑制を考えた TCSC 制御器の設計

学生員 呉 世 訓 (東京大学)
 正 員 堀 洋 一 (東京大学)

TCSC Controller Design Considering Torsional Vibration

Sehoon Oh, Student Member, Yoichi Hori, Member (The University of Tokyo)

TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor) is used mainly to change power system characteristics to improve stability. However, it is basically a static control. Considering its quick response property, it is clear that TCSC has further potential to improve transient stability. By utilizing this remarkable advantage, in this paper, a new torsional vibration suppression control of turbine-generator system is proposed. Based on the 2-inertia system model, the controlled impedance of TCSC can directly affect the generator's mechanical behavior as a controlled input, but its effect has nonlinearity. In the controller design, two approaches are proposed and compared. One is based on linear approximation and the other considers nonlinearity. The proposed method can be applied to various control systems using TCSC as a high performance control device.

キーワード : TCSC、一機無限大母線系統、軸ねじれ振動、2 慣性系、係数図法、厳密な線形化

1. 序 論

電力系統ではタービンと発電機が長い軸でつながっており、この軸を通してトルクの伝達が行われている。タービンへ入る回転トルクと発電機からの電気的出力の均衡が保たれていれば、システムは一定速度の回転運動をするが、事故等により電気的出力に変動が生じると、タービン、発電機の回転運動に影響を与えねじれが生じてしまう。実際、アメリカではこの軸ねじれ振動により軸が壊れた例もある。この振動の問題は原子力発電設備が増え、軸が長くなることが避けられない場合には大きな問題となる。

近頃パワーエレクトロニクスを利用した電力系統の制御が注目を浴びている⁽¹⁾。本研究ではパワーエレクトロニクス応用システムの一つである TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor) を利用してタービン、発電機間の軸ねじれ振動抑制制御を行う。

この TCSC は、発電機の電気的な出力を非線形的ではあるが直接制御できる特徴を持っている。しかも、TCSC はサイリスタを利用しているので高速スイッチングが可能である。これらの特徴から TCSC を利用してフィードバック制御を行うと、系統の過渡安定度向上により影響を与えることがわかる。しかし、そのような過渡安定度向上のために TCSC を積極的にフィードバック制御に利用している例はまだ少ない。

そこで、本稿では TCSC の制御器としての性質を調べ、それに合う制御則を提案する。そして、その制御手法を利

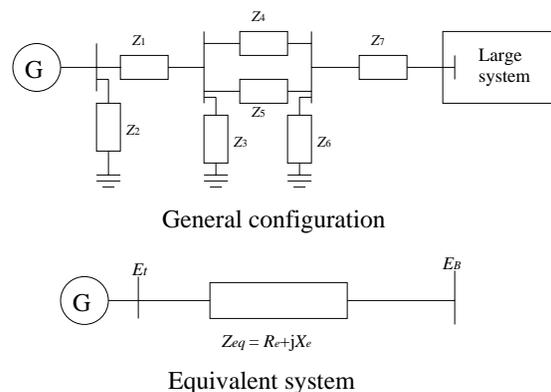


図 1 一機無限大母線系統の模式図

Fig. 1. Single machine infinite bus (SMIB) system

用して軸ねじれ振動抑制を試みる。

2. 電力系統における振動問題

電力系統において事故等により外乱が生じた時、構造上の特徴のため特定周波数の振動が残ることがある。その中で比較的高周波で問題となる 2 種類の振動がある。ローカルモード電力動揺と呼ばれる振動と、タービンと発電機間の軸ねじれ振動がそれである。

2.1 一機無限大母線系統に見られる電力動揺 系統研究によく使われるモデルの一つに一機無限大母線系統がある。実際の系統は複数の発電機がネットワークを成し

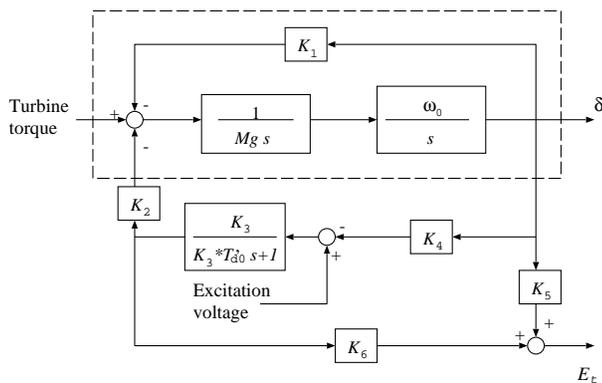


図2 一機無限大母線系統のブロック線図
Fig. 2. Block diagram of SMIB

ているが、この一機無限大母線系統は一台の発電機だけに注目して系統をみたモデルである。その構造は簡単で、一台の発電機が $R_e + jX_e$ のインピーダンスをもつ送電系統を通して無限大母線とつながっている構造である(図1参照)。ここで無限大母線というのは、電圧や周波数などが変わらない定電圧源のことである。

一機無限大母線系統を線形化したブロック線図が図2である。点線で囲んだ部分のダイナミクスをみると δ (位相差角度)と位相を合わせようとするトルクが確認できる。このトルクを同期化力というが、この力のフィードバックによって系統は外乱に対し振動をもつようになる。この振動の抑制のために普段 PSS(Power System Stabilizer) が使われている。

2.2 電力系統における軸ねじれ振動 さらにもう一つの振動として軸ねじれ振動がある。軸ねじれ振動とは、タービンと発電機が軸によってつながっている多慣性系をなすことによって起きる振動で、他の系統上の問題振動に比した時、高周波の特徴を持つ。これをブロック線図を利用して確認する。

本稿で対象としているシステムは、4台のタービンと一つの発電機が繋がった5慣性系構造となっている。すなわち、図2の一つの慣性体の部分が、5つの慣性体になっているシステムである。その多慣性系構造の周波数特性を図3に示す。実線はタービンと発電機だけの多慣性系システムの周波数特性で、破線はその発電機を一機無限大母線につないだ時の周波数特性である。

低周波部の二つの共振に注目すると1Hzと7.5Hzの共振が確認できる。その中、7.5Hzの振動が多慣性系構造から生じた軸ねじれ振動の第1モードである。1Hzの振動は2.1節で説明した電力動揺である。この電力動揺に関しては、本稿では特に考慮しないことにする。本稿ではこの中の7.5Hzの軸ねじれ振動の抑制を目標とする。

2.3 干渉による複合共振現象 電力系統で過渡安定度に影響を与える振動として、前節で説明した軸ねじれ振動以外に送電系統のLC共振による振動が存在する。さ

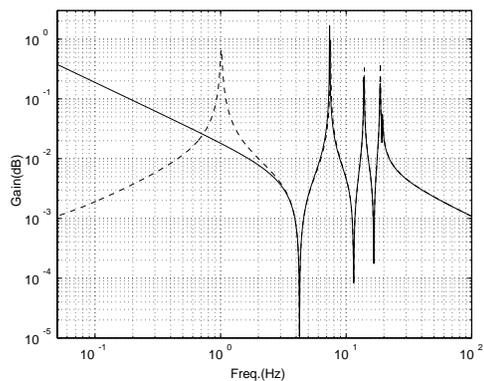


図3 5慣性系の周波数特性
Fig. 3. Frequency response of 5mass system

らに二つの振動が相互干渉してしまうと、より大きい共振を起こすことがある。

この共振現象を低周波共振(Subsynchronous Resonance; SSR)という。SSRが生じるための、振動間の周波数関係は以下のようなものである。

$$\omega_e = \omega_0 - \omega_r \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 ω_0 は電力系統の商用周波数、 ω_e はLC共振の周波数、 ω_r は軸ねじれによる振動の周波数である。

このSSRに対する対策として1970年代から1980年代はじめにかけて様々な研究がなされた⁽²⁾。

3. 振動抑制アクチュエータとしてのTCSCの提案

3.1 TCSCの位置づけ 最近、パワーエレクトロニクス技術を利用した制御機器が電力系統でも使用されるようになってきた。アメリカのEPRI(Electric Power Research Institute)ではこのような電力系統における新しいパワーエレクトロニクス応用システムをFACTS(Flexible AC Transmission Systems)という概念でまとめている⁽¹⁾。このFACTSはパワーエレクトロニクスを利用して電圧の大きさや位相、送電線のインピーダンスなどの電力系統上のパラメータを、高速かつ能動的に制御できるようにしたもので、本稿で用いるTCSCもその一種である。

3.2 TCSCの動作原理 まずTCSCの動作原理を述べる。

図4のようにTCSCは、サイリスタのスイッチングによって電流を制御し、全体のインピーダンスの値を調整することで、等価的には可変コンデンサと同じ動作をする。このような可変コンデンサ(thyristor controlled capacitor)を送電系統に直列に(series)入れると、送電系統のインピーダンスが自由に制御できるようになる。

この特徴を利用したいいくつかのTCSC制御例を紹介し、本研究の位置づけに関して述べる。

3.3 TCSCをアクチュエータとして利用した従来の制御

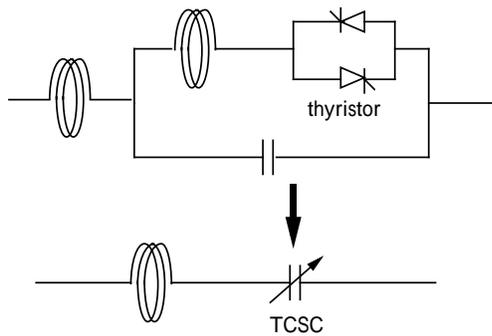


図 4 TCSC の構造

Fig. 4. Structure of TCSC

3・3・1 潮流制御 図 5 のような系統がある。そこで送電端の電圧を $E_t \angle \theta$ 、受電端の電圧を $E_B \angle 0$ 、この間のインピーダンスを jX_E としてあらわすと、この送電系統を通して流れる電力 P は式 (2) のように決められる。

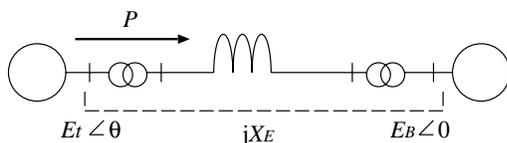


図 5 電力潮流

Fig. 5. Power Transmission

$$P = \frac{E_t E_B}{X_E} \sin \theta = P_{max} \sin \theta \dots \dots \dots (2)$$

この送電系統に TCSC を入れることによって X_E を制御することができ、 P_{max} を自由に決められる。TCSC はこのように P_{max} を制御し、潮流制御と故障回復時の系統の安定度向上を可能にした。これが TCSC をアクチュエータとして利用したもっとも代表的な系統制御例である。

3・3・2 SSR 回避 TCSC は 2・3 章で述べた SSR の回避にも有効だということが知られている⁽³⁾⁽⁴⁾。

これは送電系統のインピーダンスがもつ周波数特性が TCSC のサイリスタ点弧角により大きく変化することを利用した制御である。送電系統のインピーダンス特性を変え、式 (1) における共振周波数 f_e を変えることができる。すなわち、TCSC を入れることで式 (1) の条件が成り立たないようにする機構である。

3・4 本研究の位置づけ 以上従来の TCSC を利用した電力系統制御の例をいくつか示した。特に 3・3・2 節で述べた制御は制御の目的の面では非常に本研究と似ている。しかしこれに比べ、これから提案する制御手法は以下のような違いを見せている。

TCSC は、サイリスタのスイッチングにより極めて高速の制御器としての能力をもち、また出力電力に直接影響を与える特徴をもっている。この能力を積極的に利用し、フィー

ドバック制御を行うと高い周波数帯域をもつ系統制御器を作ることができる。従来の手法はこの特性を利用していない。しかし、本稿で提案する手法はこの特性を十分利用している制御である。

また、振動抑制に関する方針でも違いがある。

従来の SSR 回避手法は二つの振動が共振しないようにするだけであつが、提案手法は一つの振動を、フィードバックを利用して完全に抑制することを目標としているので、より本質的な振動抑制制御だといえる。

4. 新しい TCSC 制御器の提案

4・1 従来の励磁系を利用した制御入力との比較 軸ねじれ振動を抑制するためのフィードバック制御器として PSS などの励磁系を利用した制御器が提案されてきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これらの制御方式と TCSC によるフィードバック制御との違いを示す。

まず、一機無限大母線系統のダイナミクスを E'_q モデルを用いて式 (3) から式 (5) で記述する⁽⁷⁾。

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \dots \dots \dots (3)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \dots \dots \dots (4)$$

$$= \frac{1}{2H} T_m - \frac{1}{2H} \left(\frac{1}{(X'_d + X_e)} E'_q E_B \sin \delta + \frac{L_{aq} - L'_{ad}}{2(X'_d + X_e)(X_q + X_e)} E_B^2 \sin 2\delta \right)$$

$$\dot{E}'_q = e_{fd} - \frac{1}{T'_{d0s}} \frac{X_q + X_e}{X'_d + X_e} E'_q - \frac{L_{ads} - L'_{ads}}{T'_{d0s}(X'_d + X_e)} E_B \cos \delta \dots \dots \dots (5)$$

δ は発電機と無限大母線との位相差角度、 ω は δ の角速度、 E'_q は過渡リアクタンス背後電圧 (voltage behind transient reactance) である。TCSC によって変えられる値は送電系統のリアクタンス X_e である。

軸ねじれ振動抑制制御のためには ω や δ に制御入力を与えなければならない。しかし、従来の PSS によるフィードバック制御は励磁電圧 e_{fd} を制御入力としているので $e_{fd} \rightarrow E'_q \rightarrow \omega$ というダイナミクスを介して軸ねじれ振動を抑制しようとすることになる。しかも、 E'_q の時定数 T'_{d0s} が大きい値であるので、速い制御を行おうとすると制御器のゲインが高くなるなど、制御器設計に制限がつくようになる。しかし、TCSC による制御は X_e を制御入力とするので、励磁系を通す制御より速く T_e を変化させ、 ω への制御入力として作用できる。すなわち、 ω の振動制御に対して速い制御ができるのである。

4・2 提案する TCSC 制御器の設計手法 では、制御入力 X_e をどのように設計するか。式 (4) でも見られるように X_e は状態変数 δ との複雑な非線形関数を介して状態 ω に効果を及ぼす⁽⁸⁾⁽⁹⁾。そこで、本稿では図 6 のような設計法を提案する。

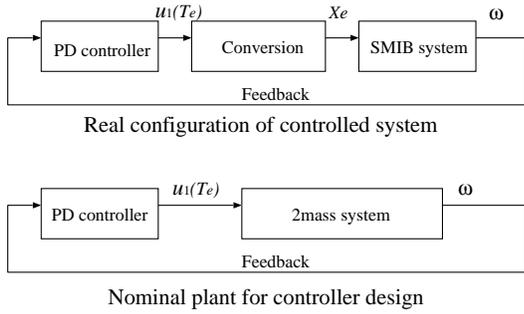


図6 制御器設計手法
Fig. 6. Control Strategy

まず、 X_e の変化 ΔX_e による出力電力の変化 ΔT_e を分離して、式 (4) を以下の式 (6) のようにまとめて制御器を設計していく。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\omega} &= \frac{1}{2H} \{T_m - T_e(\Delta X_e)\} \\ &= \frac{1}{2H} \{T_m - (T_{e0} + \Delta T_e(\Delta X_e))\} \\ &= \frac{1}{2H} (T_m - T_{e0}) + u_1(\Delta X_e) \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

X_e 値の変化によって生じるトルクの変化を u_1 とし、それを仮想的な制御入力として制御器を設計する。そして、 u_1 と ΔX_e の関係を見て $u_1 \rightarrow \Delta X_e$ の変換を行い、実際の制御入力 ΔX_e を計算する。この考え方によって制御入力 ΔX_e の非線形性を解決することができる。

そして、電力系統のノミナルモデルとしてはサーボ系制御でよく使われている 2 慣性系モデルを利用することにした。

5. 振動抑制制御

軸ねじれ振動抑制を目的とし 2 慣性系モデルをノミナルモデルとして利用すると、制御入力 u_1 もトルクの次元となるので一般的なサーボ系で使われている制御則が簡単に適用できる。そこで、 u_1 を制御入力とし、振動抑制を設計仕様とした PD 制御器を設計する。そして、その制御入力 u_1 を実際の制御入力 ΔX_e に変える変換を行うことにする。

5.1 多慣性系の 2 慣性系化 軸ねじれ振動は、タービンと発電機がなす多慣性系構造によって起きる。そこで、その軸ねじれ振動だけに注目し、図 7 のような 2 慣性系プラントを制御器設計に使うノミナルモデルとして考えることにする。

J_1, J_2, K のパラメータを決定することで、問題となっていた 7.5Hz の共振をモデリングすることができる。

5.2 係数図法による振動抑制制御系設計 振動抑制を制御目的に PD 制御器を設計する。そのゲインは真鍋らが提案した係数図法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾によって設計し、振動抑制性能をはかることにする。

図 7 のような 2 慣性系システムに PD 制御を行った場合の閉ループ特性方程式を式 (7) に示す。

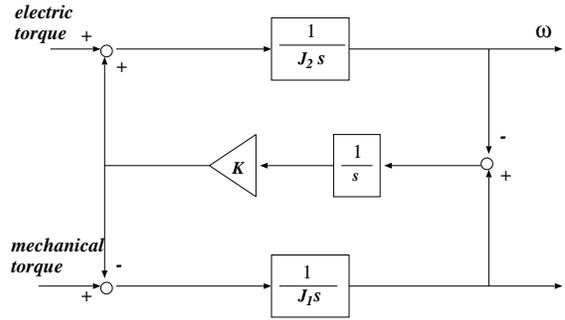


図7 2慣性系モデル
Fig. 7. 2-inertia model

$$\begin{aligned} P(s) &= (J_2 + K_D)s^3 + K_P s^2 \\ &\quad + (J_2 \omega_r^2 + K_D)s + K_P \omega_{a2}^2 \\ &= a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

ただし、各パラメータは

$$\omega_r = \sqrt{K \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right)} \dots \dots \dots (8)$$

$$\omega_{a2} = \sqrt{\frac{K}{J_1}} \dots \dots \dots (9)$$

のようである。

この特性方程式を係数図法で推奨されている標準形にあわせることで K_P, K_D のゲインを設計する。係数図法には制御仕様として、応答の速さを示す等価時定数 (τ) とシステムの安定度を定める安定指数 (γ_n) がある。しかし、そのすべてを指定するには調整パラメータが K_P, K_D の二つしかなく、自由度が足りない。ここでは振動抑制が制御の主目的であるので等価時定数の自由度はあきらめ、安定指数を標準形に合わせることにする。標準形に従い、負荷部の PD ゲインと τ は以下のように決まる。

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} = \frac{(J_2 \omega_r^2 + K_D \omega_{a2}^2)}{K_P \omega_{a2}^2} \dots \dots \dots (10)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{a_1^2}{a_2 a_0} = \frac{(J_2 \omega_r^2 + K_D \omega_{a2}^2)^2}{K_P^2 \omega_{a2}^2} \\ &= 2.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \frac{a_2^2}{a_3 a_1} = \frac{K_P^2}{(J_2 \omega_r^2 + K_D \omega_{a2}^2)(J_2 + K_D)} \\ &= 2 \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

残る問題は u_1 から ΔX_e への変換方法である。その変換のために両者の関係を詳しく記述すると式 (12) のようになる。

$$\begin{aligned} u_1(\Delta X_e) &= -\frac{1}{2H} \Delta T_e(\Delta X_e) \\ &= -\frac{1}{2H} \{T_{e0} - T_e(\Delta X_e)\} \\ &= -\frac{1}{2H} \left\{ \left(\frac{1}{X'_d + X_{e0}} E_{q0} E_B \sin \delta_0 \right. \right. \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} & -\frac{L_{aq} - L'_{ad}}{2(X'_d + X_{e0})(X_q + X_{e0})} E_B^2 \sin 2\delta_0 \\ & - \left(\frac{1}{X'_d + X_{e0} + \Delta X_e} E_{q0} E_B \sin \delta \right. \\ & \left. - \frac{L_{aq} - L'_{ad}}{2(X'_d + X_{e0} + \Delta X_e)} \right. \\ & \left. \frac{1}{(X_q + X_{e0} + \Delta X_e)} E_B^2 \sin 2\delta \right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

この関係式に基づき 6 節では、通常使われる線形化近似による変換を用いて ΔX_e の設計を行う。次に 7 節ではシステムから求めた状態変数を利用して逆演算する変換、すなわち非線形性を残した変換方式で ΔX_e を設計する。

6. 線形近似変換による制御器設計

6.1 動作点近傍での線形化近似による制御入力設計
まず、式 (12) の関係を動作点まわりで線形化近似すると、 u_1 から ΔX_e への簡単な変換を求める。

式 (12) の線形化近似から ΔX_e と u_1 の関係は以下のようになれる。

$$u_1 = -\frac{1}{2H} \Delta T_e(\Delta X_e) = -\frac{1}{2H} \frac{\partial T_e}{\partial X_e} \Delta X_e \quad (13)$$

$$\Delta X_e = -\frac{2H}{\frac{\partial T_e}{\partial X_e}} u_1 \dots \dots \dots (14)$$

この ΔX_e を制御入力にしてシミュレーションを行う。

6.2 シミュレーション結果
以上で設計した制御則を一機無限大母線系統に対して適用したシミュレーションを行い、その過渡安定度の向上を確かめる。シミュレーション開始 1 秒後に発電機端末の方で地絡事故が起き、事故発生 0.07 秒後に事故が回復されるシミュレーションを行った。

図 8 と図 9 に TCSC による制御を行った場合と行わなかった場合の、発電機がもつ角速度の変化、 ω を示した。図 8 では 1.6 秒以降に TCSC 制御の効果が現れ 7.5Hz の振動がおさまっていることがわかる。

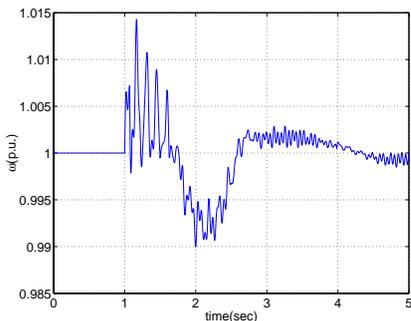


図 8 線形近似変換に基づく制御による発電機の角速度

Fig. 8. ω of generator with linear approximation control

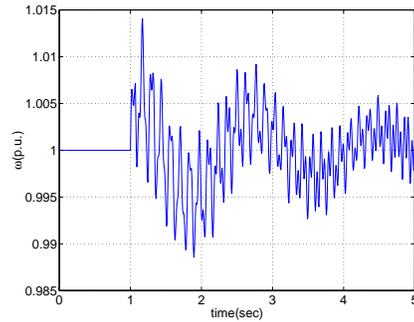


図 9 TCSC の制御を行わない場合の発電機の角速度

Fig. 9. ω of generator without control

7. 非線形変換による振動抑制制御

7.1 非線形性を残した変換の提案
式 (12) で確認したように TCSC による変数 ΔX_e は非線形入力である。6 節では T_e を動作点周りで線形化することによってこの非線形関係を簡略化して考慮した。しかし、線形化近似は正確な変換ではないので、システムのダイナミクスが近似可能範囲から離れた場合、設計した通りの制御ができなくなる。そこで、本節ではシステムの状態を利用した変換により、 ΔX_e と u_1 の非線形的な関係を保つ変換を行う。式 (12) の関係を以下の二つの仮定下で少し簡単な形にする。
仮定 1 状態変数 E_q は一定の値、 E_{q0} を持つとする。
仮定 2 $X_q > X'_d$ であるので、 $\frac{1}{X_e + X'_d}$ の変化に比べて、 $\frac{1}{X_q + X_e}$ の変化は小さい。そのことから X_e の変化があっても $\frac{1}{X_q + X_e}$ は一定の値 $\frac{1}{X_q + X_{e0}}$ をもつと仮定する。
この結果、式 (15)、(16) のような変換式を作ることができる。

$$\begin{aligned} u_1(\Delta X_e) &= -\frac{1}{2H} \Delta T_e(\Delta X_e) \\ &= -\frac{1}{2H} \{T_{e0} - T_e(\Delta X_e)\} \\ &= -\frac{1}{2H} \left\{ T_{e0} - \left(E_{q0} E_B \sin \delta - \frac{L_{aq} - L'_{ad}}{2(X_q + X_{e0})} E_B^2 \sin 2\delta \right) \frac{1}{X'_d + X_{e0} + \Delta X_e} \right\} \dots \dots (15) \end{aligned}$$

$$\Delta X_e = \frac{1}{T_{e0} + 2H u_1} \left(E_{q0} E_B \sin \delta - \frac{L_{aq} - L'_{ad}}{2(X_q + X_{e0})} E_B^2 \sin 2\delta \right) - X'_d - X_{e0} \dots \dots \dots (16)$$

実際このような方法は、非線形制御でよく使われている厳密な線形化と本質的には同じである⁽¹²⁾。厳密な線形化手法はまず非線形性のあるシステムを、状態をフィードバックさせ、演算に利用することでシステムを厳密に線形化する。そしてその線形化されたシステムの上に、線形制御則を適用して制御器設計を行う手法である。式 (16) で仮想入力 u_1 と実際の非線形システムへの入力 ΔX_e 間の変換を δ

の状態の値を利用して行うことは、厳密な線形化手法で状態フィードバックによる演算で仮想入力を作ることと同じである。

7.2 シミュレーション結果 提案した方法で制御器を設計しシミュレーションを行った。その結果と考察を述べる。

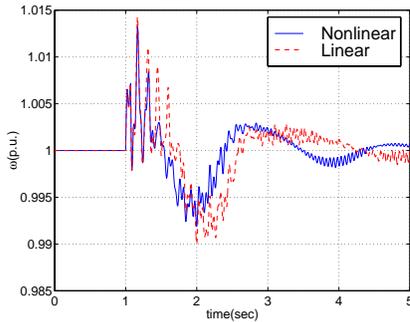


図 10 非線形変換に基づく制御による発電機の角速度

Fig. 10. ω of generator with nonlinear conversion control

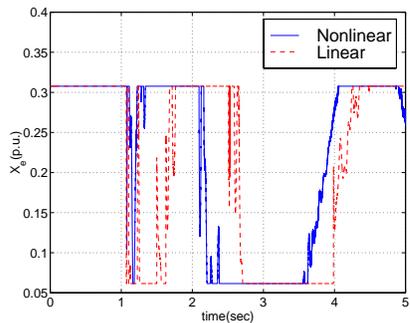


図 11 非線形変換で設計された制御入力 X_e

Fig. 11. Control input X_e designed by nonlinear conversion

図 10 に非線形変換による設計と線形近似変換による設計の制御結果の両方を示した。実線は非線形変換に基づく設計による結果、破線は線形近似変換による設計の結果を示している。非線形変換の方が多少早く振動がおさまっているが、両者間にそれほどの違いは現れない。

8. 事故時間を長くした場合の両制御手法の比較

本節では 7.2、6.2 節での事故より大規模の事故下で、両制御手法の制御効果を比較する。前節と同じ場所で地絡事故が発生するが、回復までの時間を前節の 2 倍の 0.14 秒にして両制御手法の差を調べる。図 12、図 13 に両設計手法によるシミュレーションの結果を示した。線形近似による設計手法では系統に起きた大規模の事故を安定化させることができず、系統が脱調してしまう。それに比べ非線形変換に基づく設計は、動揺がおさまるまで多少時間がかかってはいるが脱調せずに、しかも 7.5Hz の振動までも抑制し

ていることがわかる。

図 12 では 2 秒以降システムが不安定になってしまうのでシミュレーションを 2.8 秒の時点で終わらせている。

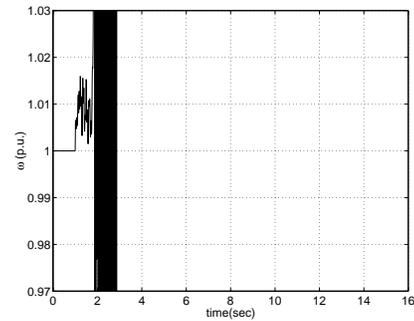


図 12 線形近似変換に基づく制御による発電機の角速度

Fig. 12. ω of generator with linear approximation control

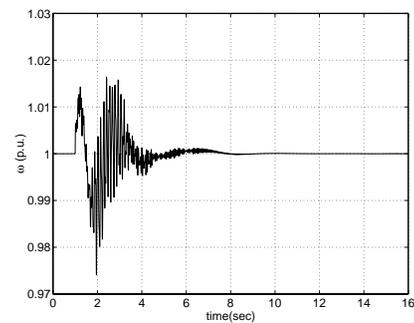


図 13 非線形変換に基づく制御による発電機の角速度

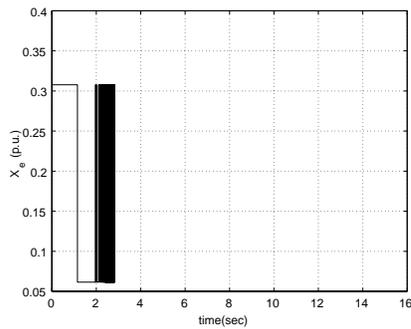
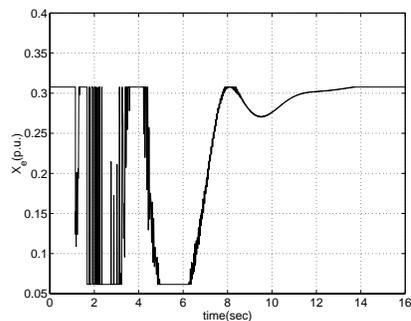
Fig. 13. ω of generator with nonlinear conversion control

図 14、図 15 には両設計手法によるそれぞれの制御入力を示した。

このようなシミュレーション結果の違いは以下のように説明できる。非線形変換の設計は動作点近傍の近似でなく、実際の状態変数をフィードバックさせ正確に ΔX_e の計算を行う設計である。すなわち制御できる範囲が広いのである。それにより、事故で系統のダイナミクスが動作点より遠く離れて、線形近似の設計手法では制御できない領域に入っても、安定性を守る制御ができたのである。

9. まとめと今後の課題

以上、TCSC を高速制御することによって電力系統に起こる軸ねじれを抑制する制御器設計法を提案した。具体的には、軸ねじれ振動抑制を考慮して 2 慣性系モデルを電力系統のノミナルモデルとして選び、フィードバック制御器としての TCSC の新しい制御則を提案した。制御則としては、線形近似を利用する、また正確な逆演算を利用する二つの設計手法を提案した。提案した線形近似設計手法と非線形変換設計手法を、電力系統へ応用した場合の制御性能

図 14 線形近似変換で設計された制御入力 X_e Fig. 14. X_e with linear approximation control図 15 非線形変換で設計された制御入力 X_e Fig. 15. X_e with nonlinear conversion control

をシミュレーションによって確認した。

本稿ではもっとも簡単な電力系統である一機無限大母線系統を対象として制御器を設計し、シミュレーションを行った。しかし、実際の電力系統はより複雑である。より現実に近いシミュレーションを行い、多機系統でもよい制御性能を示すようにするのが今後の課題だといえる。

本研究を進めるにあたり、東京電力(株)電力技術研究所・系統技術G 岡本 浩氏をはじめ、関係各位に有益な議論をいただいていることを付記し、謝意を表します。

(平成 11 年 7 月 30 日受付, 同 12 年 3 月 29 日再受付)

文 献

- (1) N.G.Hirogani : Flexible AC Transmission, *IEEE Spectrum*, April, pp.40-45, 1993.
- (2) IEEE SSR Working Group: "Countermeasures to Subsynchronous Resonance Problems", *Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No.5, 1980.
- (3) 垣本外 : 「TCSC による SSR 回避機構の解明」電学誌, Vol.117-B, No.2, pp.168-175, 1997.
- (4) W.Zhu et al.: "An EMTP Study of SSR Mitigation Using the Thyristor Controlled Series Capacitor", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.10, No.3, 1995.
- (5) 国頭 晋他 : 「タービン発電機の軸ねじれ振動抑制方式の検討」, 平成 6 年電気学会全国大会, No.1192,1193, 1994
- (6) 大橋, 全, 堀 : 「 H^∞ 制御によるタービン発電機の軸ねじれ制御 - 二慣性モデルによる検討 -」, 平成 8 年電気学会全国大会, No.883, 1996
- (7) P. Kundur : *Power System Stability and Control*, : McGraw-Hill, Inc., 1993.
- (8) V.Rajkumar et al. : Bilinear Generalized Predictive using

the Thyristor-Controlled Series Capacitor, *IEEE Trans. on Power Systems* Vol.9, No.4, pp.1987-1993, 1994.

- (9) Y.Wang et al. : Variable-structure FACTS Controllers for Power System Transient Stability, *IEEE Trans. on Power Systems* Vol.7, No.1, pp.307-313, 1992.
- (10) 堀 洋一 : 「PID 制御のみによる 2 慣性系の制御」, 電気学会論文誌 D, Vol.115-D, No.1, pp.85-86, 1995.
- (11) 真鍋 舜治 : 「係数法による 2 慣性共振制御器の設計」, 電気学会論文誌 D, Vol.118-D, No.1, pp.58-66, 1998.
- (12) SICE 若手セミナー「非線形制御系における制御系設計入門」, 計測自動制御学会, 1999.

付 録

シミュレーションに使用したパラメータの値

本稿で用いる電力系統の定数を表 1 に示す。

X_d	X_q	X'_d
1.52[pu]	1.52[pu]	0.374[pu]
E_0	T'_{d0s}	ω_0
1[pu]	10.1[pu]	50[Hz]
P	E_t	X_e
1000[MVA]	1.0[pu]	0.4[pu]
Q	M_{hp}	M_{Ipa}
0.3586[pu]	0.344[pu]	2.175[pu]
M_{Ipb}	M_{Ipc}	M_g
2.185[pu]	2.244[pu]	1.495[pu]

付表 1 本稿で使用したパラメータ

app. Table 1. Parameters of system used in this research

呉 世 訓 (学生員) 1974 年生。1998 年 3 月 東京大学工学部電気工学科卒業。2000 年 4 月より同博士課程在学中。制御工学、特に振動抑制制御、電力系統への応用に関して研究、現在は新しいデジタル制御理論の産業応用研究に従事。

堀 洋 一 (正員) 1955 年生。1978 年 東京大学工学部電気工学科卒業。1983 月 同博士課程終了。助手、講師を経て 1988 年より同電気工学科助教授。制御工学とその産業応用、特にモーションコントロールやメカトロニクス分野への応用研究、電気自動車の研究などに従事。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEE などの会員。