

TCSC の非線形性を考慮した SSR 振動抑制制御器の設計

呉 世訓*, 堀 洋一 (東京大学)

The Design of SSR Suppression Controller Considering the Nonlinear Property of TCSC

Sehoon Oh and Yoichi Hori(The University of Tokyo)

Abstract

In this paper, TCSC controller using linear feedback control law is proposed to suppress the torsional vibration. We use TCSC as a speedy feedback control actuator. We investigate the characteristic of TCSC and design feedback controller. By numerical simulation, the control performance is validated

キーワード: TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor), SSR(Subsynchronous Resonance), 2 慣性系, 逆演算, 係数図法

(Keywords: TCSC, SSR, 2-mass system, inverse calculation, CDM(Coefficient Diagram Method))

1 序論

現代の様々な文明の利器が発達は電気エネルギーなしにはありえなかったものである。このような電力を供給している電力系統における安定度の問題は、これからの社会においてもますます重要になってくる問題である。電力系統の安定度はいくつかのレベルで論じることができるがここでは、以下のような過渡安定度を問題として解決を試みる。

その一つとして、タービンと発電機の多慣性系構造から生じる軸ねじれ振動は電力系統において問題となっている。特に、原子力発電の場合など、軸が長くなることが避けられない場合には軸ねじれ振動は大きな問題となり、実際アメリカではこの振動により軸が破断した例もある。

この振動抑制のために PSS や AVR 励磁系を通したいくつかの制御手法が提案されている [1][2]。しかし、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) を利用して振動抑制制御を行うことを提案する。TCSC はサイリスタを利用しているので高速スイッチングも可能であり、従来の PSS や AVR を利用した制御より速い制御応答を得ることができる特徴を持つ。

2 低周波共振 (SSR) の機構説明 [5]

電力系統において故障などにより外乱が生じたとき、安定度に大きい問題が起きることがある。特に系統特有の構造により起きた特定周波数の振動が簡単におさまらず、悪い影響を及ぼしつづけることがしばしばある。その中に本研究で解決しようとしている SSR という振動がある。

2.1 同期周波数とのずれによる自己励磁現象

大きい系統では送電系統が長くなり送電線上のインダクタンス L の値が大きくなる。 L の値が大きくなると供給できる電力の最大量が低くなってしまいう問題が発生するので、これを補償するために直列コンデンサを送電系統に入れることがある。しかし、 L が入った系統へ直列に C が入ることで、電気的な共振が起こる可能性が出てくる。

発電機のステータとロータでの電気的なダイナミクスは dq 変換を行い、図 1 のような誘導機の等価回路として考えることができる。基本的に発電機は同機器と同じ動きをするが、何かの事情によって商用周波数とは違う速度で回転した場合を想定すると、式 (1) のようなスリップを利用して表すことができる。

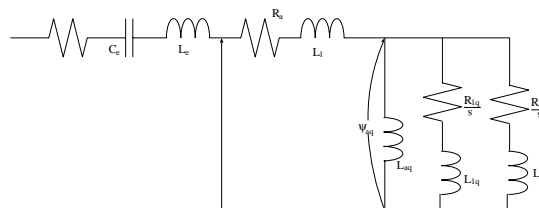


図 1: スリップを考慮した発電機の等価回路 (q 軸)

$$s = \frac{f_n - f_0}{f_n} \quad (1)$$

但し、 f_n はロータの回転周波数であり、 f_0 は商用周波数つまり系統の定格回転周波数である。

$f_n < f_0$ の場合、 R_{eff} が負になる。このとき自己励磁現象が起きるようになる。すなわち、進み電流が発電機に

流れ、それにより発電機の電気子反作用が増磁される。すると発電機の端子電圧は異常に上昇することになる。しかも最初に説明した L_{eff}, C_{eff} による共振の周波数がこの自己励磁を起こす回転数の領域であるとする、周波数 f_n の振動は大きく共振する可能性を持つ。

2.2 タービン、発電機間の軸ねじれ振動

タービン、発電機は複数の慣性がつながった多慣性系構造を持っている。この機械的な構造から起きる振動がある。これは一般的なサーボ系制御時にも良く現れる、いわゆる 2 慣性系構造から起きる振動である。

2.3 相互干渉による複合共振現象

2.1 で説明した理由で、角周波数 ω_0 励磁振動電流が電気系で発生し、それが ω_1 の角周波数で振動している主磁束と交差すると、回転するロータ側に角周波数 $(\omega_1 - \omega_0)$ のトルクを発生する。

もし、タービン軸系の軸ねじれによる固有周波数がこれに共振すれば、大きな軸ねじれを生ずる。このように電源周波数以下の周波数で起きる共振現象を広く低周波共振 (Subsynchronous Resonance; SSR) という。

SSR が生じる場合の、各振動の周波数関係を式で表すと

$$f_e = f_0 - f_m \quad (2)$$

である。ただし、 f_0 は電力系統の商用周波数 (関東は 50Hz, 関西は 60Hz)、 f_e は電氣的共振による自己励磁振動の周波数、 f_m は軸ねじれによる振動の周波数である。

3 振動抑制アクチュエータとしての TCSC の提案

最近、パワーエレクトロニクス技術の発達により様々なパワーエレクトロニクス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。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、アメリカの EPRI (Electric Power Research Institute) では FACTS (Flexible AC Transmission Systems) という概念でまとめて紹介している [3]。パワーエレクトロニクスを利用すると電圧の大きさ、電圧の位相、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なる。本研究ではその FACTS の一種である TCSC を用いた新たな制御をこころみる。

3.1 従来の TCSC による SSR 回避

TCSC は 2 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 [6],[7]。

これは図 2 のように送電系統のインピーダンスの周波数特性がサイリスタの点弧角の変更により大きく変化すること起因する。この TCSC の変化により送電系統全体のインピーダンス特性が変わると式 (2) における電氣的な共振周波数 f_e が変わってくる。すなわち、TCSC を入れることで式 (2) の条件が成り立たないようにする機構である。

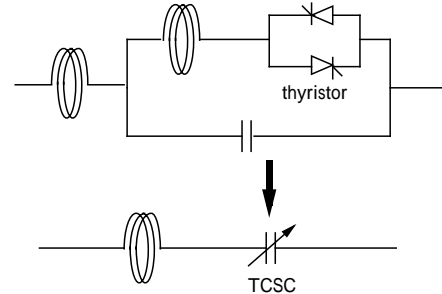


図 2: Structure of TCSC

3.2 本研究の位置づけ

本研究では SSR を抑制させる TCSC 制御器を設計する。同じ目的で TCSC を利用した例である 3.1 節で調べた従来の方式に比べ、これから提案する振動抑制制御手法は以下のような違いを見せている。

TCSC にあるサイリスタの高速スイッチング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。従来の手法だと単に共振が起こらないように何回かスイッチングを行っているだけになるが、それとは違い、本研究では TCSC の速い制御特性を十分利用して制御を行うのである。

そして、2 番目に振動抑制する方針も違う。

前述したように従来手法は二つの振動が共振しないようにするだけだが、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の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 制御器設計の提案

4.1 設計の基本的な考え方

では、制御入力 X_c をどのように設計するか。後ほどの式 (5) でも見られるように X_c は複雑な非線形的な形ではあるが電氣的なトルクに直接効果を及ぼす [11][12]。

そこで、このような特性を考慮して、図 3 の方針で X_c を制御入力とする制御系設計を行う。

図 3 の説明をする。まずは X_c の変化 ΔX_c による電氣的な出力の変化を ΔT_c として以下の式 (3) のようにまと

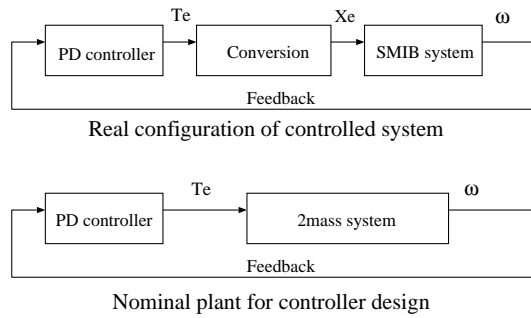


図 3: Control strategy

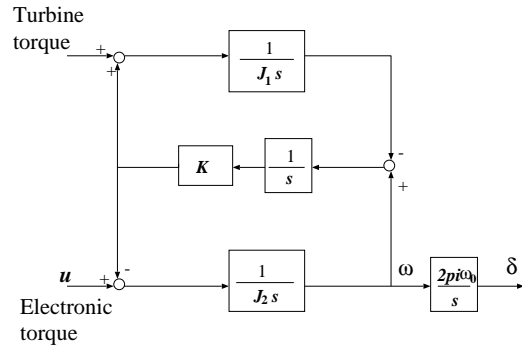


図 4: 2massed model

めて考える。

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{\omega} &= \frac{1}{2H} \{T_m - T_e(\Delta X_e)\} \\
 &= \frac{1}{2H} \{T_m - (T_{e0} + \Delta T_e(\Delta X_e))\} \\
 &= \frac{1}{2H} (T_m - T_{e0}) + u_1(\Delta X_e) \quad (3)
 \end{aligned}$$

すなわち、電気的な出力の変化によって生じるトルクの変化を u_1 と等価的にみて、 u_1 を仮想的な入力トルクとして制御器を設計するのである。そして、 u_1 と ΔX_e の関係、式 (5) を見て $u_1 \rightarrow \Delta X_e$ の変換を行い、実際の制御入力 ΔX_e を計算するといった手順である。

この考え方は軸ねじれ振動抑制を目的とする制御器だけでなく TCSC を利用する他の制御器設計にも適用できる。トルク u_1 を仮想入力と考えることができるので、制御器設計に用いるノミナルモデルは ΔX_e の非線形的な性質は考慮せずに線形的に作ることができる。

4.2 タービン、発電機の 2 慣性系化

前節で述べたように 7.5Hz の軸ねじれ振動を解決するためにはタービンと発電機がなす多慣性系に注目しなければならない。ここではノミナルモデルとして 2 慣性系プラントを考え、図 4 のようなモデルを提案する。実際は 4 台のタービンと発電機といった 5 つの慣性体をもつ一機無限大母線系統のシステムであるが、図 5 での 7.5Hz の周波数をもつ振動だけを捉え、このようなモデリングを行った。

J_1, J_2, K_s のパラメータを適切に決定することで、問題となっている 7.5Hz の共振をモデリングすることができる。システムのすべてをモデリングし制御器を設計するのは、システムの複雑さを考えると難しいことである。そこで、本研究では抑制したい振動だけに対するロバストな制御器を設計する方針をとる。ノミナルプラントに含まれていない部分は制御器がロバストであれば、それほど制御性能には影響を与えないようになる。

周波数特性からこのモデリングの妥当性を確認する。実線はタービンと発電機だけのシステムから、破線はそのシステムの上に同期化トルクをフィードバックさせたシステ

ムから得られたボーデ線図である。低周波部の二つの共振に注目する。1Hz と 7.5Hz の共振が確認できる。1Hz の振動がローカルモード電力動揺で、7.5Hz の振動はタービンと発電機間の多慣性系構造から生じた振動の第 1 モードであることがわかる。本研究ではこの中の 7.5Hz の軸ねじれ振動の抑制を目標とする。

ノミナルモデルから見た TCSC 入力特性

従来、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 や AVR (Automatic Voltage Regulator) などの制御器が使われてきた。ここでは、これらの制御方式と TCSC による制御との違いを示す。

まず、一機無限大母線系統の運動を E'_q モデルを用いて

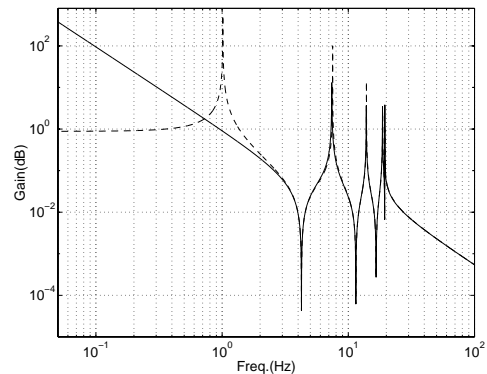


図 5: Frequency response of 5 mass system

式 (4) から式 (6) に記述する [4]。

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega \quad (4)$$

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{1}{2H}(T_m - T_e) \quad (5)$$

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

$$\dot{E}'_q = e_{fd} - \frac{1}{T'_{d0s}} \frac{X'_q + X_e}{X'_d + X_e} E'_q - \frac{L_{ads} - L'_{ads}}{T'_{d0s}(X'_d + X_e)} E_B \cos \delta \quad (6)$$

δ は発電機と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外部リアクタンスの X_e である。

軸ねじれ振動抑制制御のためには ω や δ のダイナミクスに制御入力を与えなければならない。しかし、従来の PSS や AVR による振動抑制制御器は励磁電圧 e_{fd} を制御入力としていて $e_{fd} \rightarrow E'_q \rightarrow \omega$ といったダイナミクスをもって軸ねじれ振動を抑制しようとすることになる。

これをブロック線図で表すと図 6 のようになる。プラント 1 の方が PSS などの励磁電圧を利用した制御システムで、プラント 2 が TCSC を利用した場合である。プラント 1 にはローパスフィルタが入っていることがわかる。このローパスフィルタにより同じ影響をタービン、発電機系に与えようとしてもプラント 2 より大きい制御器出力が必要となってくるのである (但し K_3, K_2, T_{d0} は発電機のパラメータである)。

反面、式 (6) でも確認できるように、 X_e はシステムの状態方程式において、他の状態とかけられるなど、極めて非線形的な項として入っている。この非線形性は X_e に関する設計を行う際に一つの問題点になる。

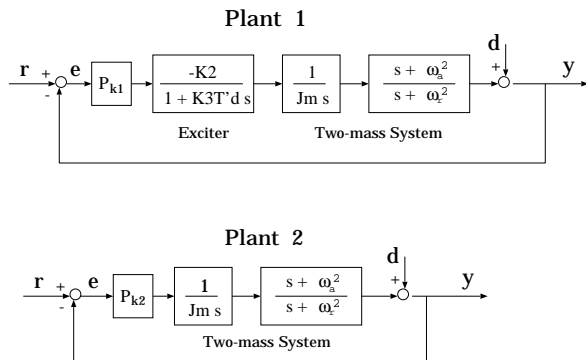


図 6: Comparison of Two Plants

4.3 線形制御を利用した振動抑制制御器の設計

振動抑制という制御目的を考えると PD 制御が良い。ここでは PD 制御による振動抑制制御器を設計する。特にゲインの設計は東海大学の真鍋教授が提案した係数図法によって行う。提案した 2 慣性系ノミナルモデルに 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。

$$P(s) = (J_2 + K_D)s^3 + K_P s^2 + (J_2\omega_r^2 + K_D)s + K_P\omega_{a2}^2$$

$$= a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \quad (7)$$

この特性方程式を係数図法にあわせることで K_P, K_D のゲインを設計する。振動抑制という制御目的を考慮し、システムを安定化させるために前節で述べた真鍋標準形に従うことにする。しかし、方程式 3 つに PD ゲインと等価時定数 τ の 3 つの変数がある。すなわち、変数 3 つに対する自由度が足りなく、 K_D, K_P を標準形に合わせることで、等価時定数 τ は決定されてしまう。ここでは振動抑制が主な制御目的であるので τ の自由度よりは標準形に従うことにする。標準形に従い、PD ゲインと τ は以下のようにして決める。

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} = \frac{(J_2\omega_r^2 + K_D\omega_{a2}^2)}{K_P\omega_{a2}^2} \quad (8)$$

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

$$= 2.5$$

$$\gamma_2 = \frac{a_2^2}{a_3 a_1} = \frac{K_P^2}{(J_2\omega_r^2 + K_D\omega_{a2}^2)(J_2 + K_D)}$$

$$= 2 \quad (9)$$

4.4 非線形性の考慮した設計法

4.4.1 動作点近傍での線形化近似による制御入力実現 (手法 1)

式 (3) で u_1 は X_e の関数になることを述べた。前節までで設計したのは u_1 の値であって、実際の TCSC の出力を設計するためには u_1 に基づく X_e を設計しなければならない。ここでは、 u_1 と X_e の関係から $\Delta X_e \Leftarrow u_1$ への変換を行うことで、 X_e の設計をする。

本節では式 (10) の関係を動作点まわりの線形化近似することで求める。 ΔX_e によって変わる ΔT_e を、以下のよう線形化した関係であらわせる。

$$T_e = \frac{1}{X'_{Td}} E'_q E_B \sin \delta + \frac{L_{aq} - L'_{ad}}{2X'_{Td} X_{Tq}} E_B^2 \sin 2\delta \quad (10)$$

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial X_e} \Delta X_e \quad (11)$$

$$\Delta X_e = -\frac{2H}{\frac{\partial T_e}{\partial X_e}} u_1 \quad (12)$$

式 (11) のように ΔT_e と ΔX_e の関係が決められると、その逆算から $u_1 \rightarrow \Delta T_e \rightarrow \Delta X_e$ は計算できる。

4.4.2 正確な逆変換を利用した設計 (手法 2)

式 (4) から (6) までをみると、TCSC による変数 ΔX_e を制御入力として含むシステムは非線形性を示していることがわかる。4.4.1 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避けることができた。線形的に一定ゲイン ($-\frac{1}{2H} \frac{\partial T_e}{\partial X_e}$) をかけるだけで図 3 における $u_1 \rightarrow X_e$ の変換を行ったのである。しかし、線形化近似を行っているので正確な変換ではない。そこで、本節ではシステムの状態を利用することにより「 $u_1 \Rightarrow \Delta T_e \Rightarrow \Delta X_e$ 」の非線形性を残した変換を行う。このようにすることで広い制御領域を得ることができる。

式 (3) の関係を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 の変化があっても一定の値 $\frac{1}{X_q + X_{e0}}$ をもつと仮定する。

この結果、式 (14) の変換ができる。 δ は制御器にフィードバックされるシステムの状態変数 ω を積分することで求める。

$$\begin{aligned} u_1(\Delta X_e) &= -\frac{1}{2H} \Delta T_e(\Delta X_e) & (13) \\ &= -\frac{1}{2H} \{T_{e0} - T_e(\Delta X_e)\} \\ \Delta X_e &= \frac{1}{T_{e0} + 2\Delta T_e} (E_{q0} E_B \sin \delta \\ &\quad - \frac{L_{aq} - L'_{ad}}{2(X_q + X_{e0})} E_B^2 \sin^2 \delta) \\ &\quad - X'_d - X_{e0} & (14) \end{aligned}$$

この結果、 u_1 が決まり、 δ 、 E'_q の値がわかれば必要な X_e の値を簡単に求めることができる。状態 E'_q は一定だと仮定し、 δ は観測できる ω を積分することで求めることでより簡単に X_e を決めることができる。

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 [10]。厳密な線形化手法では非線形性のあるシステムを、状態をフィードバックし演算に利用することでシステムを厳密に線形化する。そしてその上、線形制御則を適用して制御器設計を行う手法である。式 (14) で δ の状態の値を利用して線形ノミナルモデルに対する入力 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。

5 提案手法の有効性確認のためのシミュレーション

5.1 軽故障 (故障持続時間 70ms) 時のシステム

一機無限大母線系統に AVR と PSS をつけた上 TCSC による制御性能確認のシミュレーションを行った。事故としては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末端電圧が 0V になるが、事故発生 0.07 秒後に事故が回復されるようにした。また、TCSC による軸ねじれ振動制御を事故回復時に同時に入れるようにした。

図 7(a) と図 7(b) に TCSC による制御を行った場合とそうでない場合のシミュレーション結果を示す。1.6 秒からは 7.5Hz の振動が TCSC 制御により収まっていることがわかる。

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 7(c) を見ると提案手法 1 との比較ができる。実線は提案手法 2 による応答、破線は提案手法 1 による応答を示している。非線形制御が少し早く振動が収まる程度で大きい違いは現れていない。これは系統に起きた故障がそれ程大きくない場合の例で、少し故障の規模を大きくすると両提案制御手法の違いが現れる。

5.2 過故障 (故障持続時間 140ms) 時のシステム

5.1 節での故障条件は故障から故障回復までの時間を 70ms にしていた。本節ではより大きい故障として同じ場所起きた地絡事故が発生 0.14 秒後に回復されるようにして両制御手法の差を調べる。図 8 の (a) と (b) に提案手法 1 と提案手法 2 による角速度の変化を示した。制御手法 1 だと系統に起きた大きい故障をおさめることができず系統が脱調してしまう。それに比べ制御手法 2 は動揺が収まるまで少し時間がかかってはいるが脱調せずに、しかも 7.5Hz の振動までをも抑制させていることがわかる。

6 シミュレーション結果の分析

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。提案手法 2 は動作点近傍の近似でなく実際の状態をフィードバックさせて正確に ΔX_e の計算を行う。すなわち制御できる範囲が広いのである。それにより故障で系統の状態が動作点より遠く離れて提案手法 1 では制御できない領域に入っても制御ができたのである。このことから提案手法 1 より提案手法 2 の方が高いロバスト性を持っているといえる。

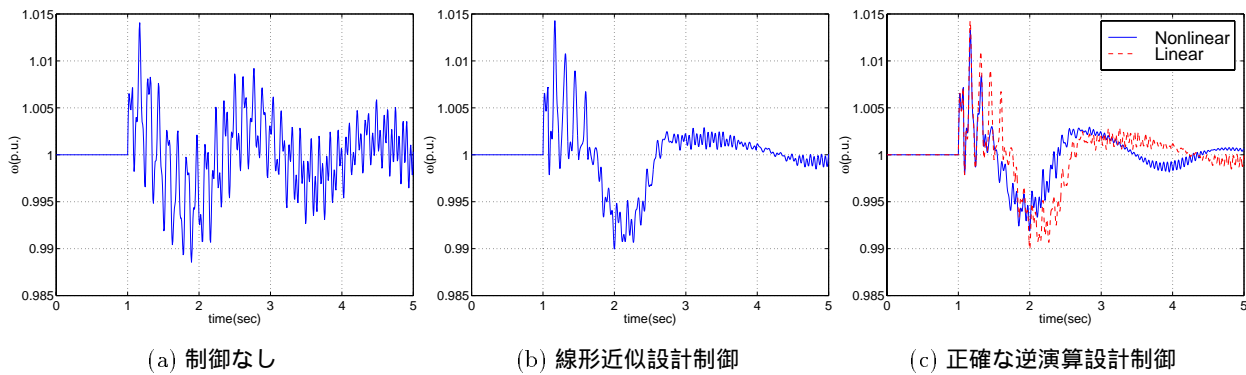


図 7: シミュレーション結果 (故障持続時間 70ms)

7 結論と今後の課題

以上、TCSC のリアクタンス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新しい制御器設計法を提案した。図 3 がこの制御器設計の主力方針であった。より具体的にまとめると

1) フィードバック制御器としての TCSC の新しい制御則提案、2) 軸ねじれ振動抑制を考慮した電力系統のノミナルモデル提案、3) 提案制御則のシミュレーションによる確認、4) 線形制御則と非線形制御則の電力系統への応用と性能確認を本研究では行った。

また、今後の課題としては 1) 他のシミュレータを利用した制御器性能の確認、2) 送電系統のダイナミクスを考慮した逆演算、3) より電力系統に適した逆演算法の考慮、4) コスト面などの現実的な TCSC と励磁系制御器の比較のようなものが考えられる。

参考文献

[1] 国頭 晋外:「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

[2] 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

[3] N.G.Hirogani: Flexible AC Transmission, *IEEE Spectrum*, April, pp.40-45, 1993.

[4] P. Kundur: *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1993.

[5] 関根 泰次:「電力系統過渡解析論」, オーム社, 1984.

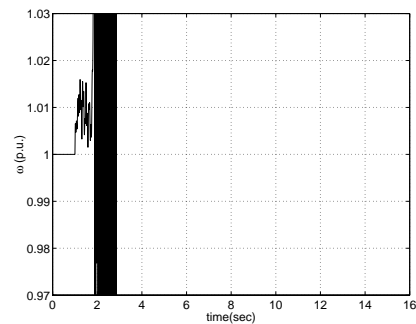
[6] 垣本外:「TCSC による SSR 回避機構の解明」 電学誌, Vol.117-B, No.2, pp.168-175, 1997.

[7] W.Zhu et al.: "An EMTF Study of SSR Mitigation Using the Thyristor Controlled Series Capacitor", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.10, No.3, 1995.

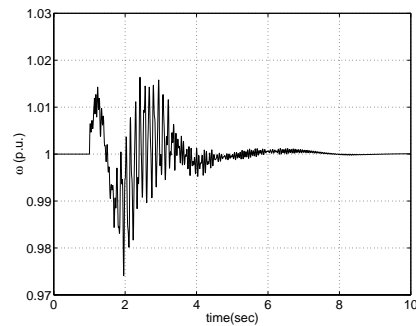
[8] 真鍋 舜治:「係数図法による 2 慣性共振制御器の設計」, 電気学会論文誌 D, Vol.118-D, No.1, pp.58-66, 1998.

[9] 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.

[10] 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.



(a) 線形近似設計による制御結果



(b) 正確な逆演算設計による制御結果

図 8: シミュレーション結果 (故障持続時間 140ms)

[11] 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.

[12] 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.