TCSC による SSR 回避機構の解明

正員 垣 本 直 人 (京 都 大)
 正員 飯 田 章 弘 (京 都 大)
 非会員 関 守 弘 (京 都 大)
 正員 箕 山 和 也 (京 都 大)
 正員 宅 間 董 (京 都 大)

Clarification of SSR Mitigation Mechanism of TCSC

Naoto Kakimoto, Member, Akihiro Iida, Member, Morihiro Seki, Non-member, Kazuya Minoyama, Member, Tadasu Takuma, Member (Kyoto University)

Thyristor controlled series capacitor (TCSC) is considered to be effective not only for flow control and stabilization of power systems, but also for mitigation of subsynchronous resonance (SSR). This paper clarifies SSR mitigation mechanism of TCSC. First, we show by time simulations that SSR appears and disappears depending on the firing angle of TCSC. Next, we show that its frequency characteristics varies much with the firing angle. Further, we show that SSR occurs in TCSC-compensated systems as well as in conventional series-capacitor-compensated systems when 60 Hz minus an electrical resonance frequency of a transmission system coincides with a torsional oscillation frequency of a generator-turbine shaft. TCSC can avert SSR by changing its firing angle and by shifting the electrical resonance frequency. Next, we propose an equivalent circuit of TCSC which consists of a series capacitor in parallel with a resistor and a reactor. We adjust its parameters so that it shows frequency characteristics same as TCSC. We apply it to time simulations to see if it work equivalently as TCSC. Finally, we do eigenvalue analysis with the equivalent circuit. We can get results corresponding to the time simulations.

キーワード：電力系統, FACTS, TCSC, SSR

1. はじめに

電力系統における新しい試みとして、パワーエレクトロニクス技術による柔軟な輸送システム (FACTS) の構築が提唱されている⁽¹⁾。サイリスタ制御直列コンデンサ (TCSC) はその主力をなす機器である。直列コンデンサと並列リアクトルを入れ、その通過電流をサイリスタにより調節する。等価的に直列コンデンサのリアクタンスを変えることができ、系統の潮流制御や安定化制御が可能となる。同時に、従来の直列コンデンサで問題となっていた低周波共振 (SSR)⁽²⁾ の回避にも有効であるといわれている。TCSC によりリアクタンスを補償することで、送電線の熱容量まで輸送量を増すことができれば、送電系統の経済的効率は大幅に向上する。

TCSC による SSR の回避作用については、いくつかの検討がこれまでになされている^{(3)~(7)}。Nyati⁽³⁾ らは、アナログシミュレータにより発電機の電氣的ダンピングトルクの周波数特性が TCSC により改善されることを確認して

いる。一方、Hedin⁽⁴⁾ らは、TCSC が周波数の低い領域において誘導性のリアクタンスとして働くことを示している。Dickmader⁽⁵⁾ らは、シミュレータにより TCSC のインピーダンスの周波数特性を求め、Hedin らの結果を確認している。しかし、なぜ SSR が回避できるかについては検討していない。Zhu⁽⁶⁾ らも TCSC の周波数特性を求めている。しかし、Hedin らの結果と異なり、TCSC はすべての周波数で容量性リアクタンスとして働いている。そのため、Zhu らは SSR 回避作用の原因を、低周波領域で抵抗値が大きくなることに求めている。一方、瞬時波形シミュレーションから実効値ベースのモデルを求め、それにより固有値解析を行う試みが Othman⁽⁷⁾ らによりなされている。ポアンカレ写像⁽⁸⁾ により導出された式は、本質的に直列コンデンサ両端の電圧の時間変化を示す一次の微分方程式である。これでは TCSC の周波数特性を表現することはできない。また、固有値解析による軸振動の減衰速度がシミュレーション結果と大きく異なっており、モデルの妥当性に疑問が残る。以上、TCSC の周波数特

性が SSR の回避に重要であるが、両者のかかわりはまだ明らかになっていない。

本論文では、Hedin⁽⁴⁾、Dickmader⁽⁵⁾らの流れにそって TCSC による SSR の回避機構を明らかにする。まず、シミュレーションにより、TCSC の点弧角によって SSR が現れたり消えたりすることを示す。次に、瞬時波形解析により TCSC のインピーダンスの周波数特性を求め、点弧角による特性の変化と SSR の関係を調べる。それにより、従来の直列コンデンサ補償系統と同じく、TCSC 補償系統でも送電系統の電氣的な固有振動数が発電機軸系の固有振動数に一致するときに SSR が発生することを示す。TCSC では点弧角により送電系統の固有振動数を移動させることができ、それによって SSR を回避することができる。また、TCSC の等価回路として直列コンデンサと並列に抵抗およびリアクトルを入れた回路を提案し、そのパラメータを TCSC のインピーダンスの周波数特性に合うように決める。次にこの等価回路によりシミュレーションを行い、TCSC による結果とほぼ同じ結果が得られることを確認する。また、等価回路により固有値解析を行い、シミュレーション結果との対応を調べる。等価回路による固有値解析は大規模な系統の解析に有効である。

以下、第2章では対象系統や TCSC を記述する方程式について述べ、第3章ではシミュレーションにより TCSC の点弧角と SSR の有無の関係を調べる。第4章では TCSC のインピーダンスの周波数特性、更に送電線と組み合わせたときのリアクタンスの周波数特性と SSR の関係を調べる。第5章では TCSC の等価回路を導き、第6章では等価回路による SSR の解析を行う。これにより TCSC の SSR 回避作用を確認するとともに等価回路の妥当性を確認する。

2. 系統の記述

図1に対象とする一機無限大母線系統を示す。発電機が長距離送電線を介して無限大母線につながれている。送電線のリアクタンスが大きくなるため、サイリスタ制御直列コンデンサ (TCSC) により補償するものとする。

TCSC は、直列コンデンサ C と並列にリアクトル L を置き、その通過電流をサイリスタにより制御する。 r はリアクトルの内部抵抗を表す。

図2にコンデンサ両端の電圧とリアクトルの電流を示す。サイリスタはコンデンサ電圧の零点を基準として一定の点弧角 ϕ でオンする。点弧角により TCSC のリアクタ

ンスを変えることができる。点弧角を 180° とすればリアクトルに電流が流れず、従来の直列コンデンサと等価になる。

系統の定数を表1に示す。単位法のベースは 500 kV, 1,000 MVA とする。発電機は同期機であり、SSR の解析では一般にパークの詳細モデルを用いる⁽⁹⁾。しかし、本論文では TCSC による SSR 回避機構の解明が目的であり、簡単のため、発電機を定電圧源で表し、発電機と昇圧用変圧器のインピーダンスは送電線インピーダンスに含めて考える。

図2のように、電圧電流波形が正弦波でなくなるため、次式により波形シミュレーションを行う。

$$\frac{di}{dt} = \frac{v - v_b - v_c - r_0 i}{L_0} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{i - i_l}{C} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{v_c - r i_l}{L}, \quad 0 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 i : 送電線電流, i_l : リアクトル電流,
 v : 発電機端子電圧, v_b : 無限大母線電圧, v_c :
 コンデンサ電圧

計算は a, b, c 各相について行う。 d, q 座標への変換はパークの変換により行う。無限大母線電圧を座標の基準とする。発電機出力は次式により与えられる。

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 v_d, v_q, i_d, i_q : それぞれ発電機端子電圧
 と送電線電流の d, q 軸成分

一方、低周波共振 (SSR) の解析では発電機タービン

図2 TCSC の電圧電流
 Fig. 2. Voltage and current of TCSC.

図1 対象系統
 Fig. 1. Model power system.

表1 系統の定数 (pu)
 Table 1. System parameters (pu).

送電線抵抗 r_0	0.02
送電線インダクタンス L_0	0.002387
TCSC のキャパシタンス C	0.008840
TCSC のインダクタンス L	0.0001358
TCSC の抵抗 r	0.002

図 3 発電機タービン軸系
Fig. 3. Generator-turbine shaft system.

表 2 発電機タービン軸の定数 (pu)
Table 2. Parameters of generator-turbine shaft (pu).

H	D	k
$H_1=0.0929$	$D_1=0.012$	$k_{12}=19.303$
$H_2=0.1556$	$D_2=0.001$	$k_{23}=34.929$
$H_3=0.8587$	$D_3=0.085$	$k_{34}=52.038$
$H_4=0.8842$	$D_4=0.080$	$k_{45}=70.858$
$H_5=0.8685$	$D_5=0.200$	$k_{56}=2.8220$
$H_6=0.0342$	$D_6=0.018$	

軸系を詳細に表現する必要がある。ここでは図 3 のような 6 質点系を考える⁽⁹⁾。軸系の方程式は次式により与えられる。

$$m_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{m1} - k_{12}(\delta_1 - \delta_2) - d_1 \omega_1 \quad (5)$$

$$m_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_{m2} - k_{12}(\delta_2 - \delta_1) - k_{23}(\delta_2 - \delta_3) - d_2 \omega_2 \quad (6)$$

$$m_3 \frac{d^2 \delta_3}{dt^2} = P_{m3} - k_{23}(\delta_3 - \delta_2) - k_{34}(\delta_3 - \delta_4) - d_3 \omega_3 \quad (7)$$

$$m_4 \frac{d^2 \delta_4}{dt^2} = P_{m4} - k_{34}(\delta_4 - \delta_3) - k_{45}(\delta_4 - \delta_5) - d_4 \omega_4 \quad (8)$$

$$m_5 \frac{d^2 \delta_5}{dt^2} = -k_{45}(\delta_5 - \delta_4) - k_{56}(\delta_5 - \delta_6) - P_e - d_5 \omega_5 \quad (9)$$

$$m_6 \frac{d^2 \delta_6}{dt^2} = -k_{56}(\delta_6 - \delta_5) - d_6 \omega_6 \quad (10)$$

ただし、各質点 i について、 m_i ：慣性定数、 δ_i ：回転子角、 P_{mi} ：機械的入力、 k_{ij} ： ij 間の軸ねじれ弾性係数、 d_i ：制動係数、 ω_i ：角速度、 P_e ：電氣的出力。

表 2 に解析で用いる軸系の定数を示す。ただし、 $m_i = H_i/60\pi$, $d_i = D_i/120\pi$ 。また、 $P_{m1} \sim P_{m4}$ はそれぞれ機械的入力全体の 20, 20, 30, 30% を分担する。

3. TCSC 補償系統における SSR

図 3 の発電機タービン軸系は 6 質点からなるため、六つの固有振動モードが存在する。表 3 に軸系単独の各モードに対する固有値を示す。モード 1~5 は軸系のねじれ振動に対応する。モード 6 は回転子角が全体的に平行移動するモードであり、系統接続時はある一定の周期で動揺するモードとなる。

SSR は、発電機タービン軸系のねじれ振動が送電系統の電氣的振動と共振することによって不安定になる現象で

表 3 発電機タービン軸の固有値
Table 3. Eigenvalues of generator-turbine shaft.

モード	固有値
1	$-0.011 \pm j 47.456$
2	$-0.031 \pm j 32.285$
3	$-0.031 \pm j 25.547$
4	$-0.120 \pm j 20.211$
5	$-0.043 \pm j 15.712$
6	$-0.068 \pm j 0.000$

(虚数部の単位は Hz)

図 4 TCSC と SSR の関係
Fig. 4. Relation between TCSC and SSR.

ある。例えば、TCSC の点弧角を 180° とすれば、コンデンサにのみ電流が流れ、従来の直列コンデンサと同じになる。このときの SSR については発生条件が明らかにされている。すなわち、送電系統の電氣的な固有振動数は

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}} \approx 34.6 \text{ Hz} \quad (11)$$

となる。一方、発電機の回転子がある周波数 f_m で振動すると、送電系統には周波数 $(60 - f_m)$ (Hz) の電圧変動が生ずる。SSR は、この周波数が系統の電氣的振動周波数と一致するときに発生する。すなわち、

$$f_e = 60 - f_m \quad (12)$$

が SSR 発生条件となる。表 3 を見ると、モード 3 の周波数が 25.5 Hz であり上記の条件をほぼ満たしている。従って、TCSC の点弧角を 180° にすると、モード 3 が SSR により不安定となることがわかる。

図 4 に TCSC 補償系統における SSR を示す。TCSC の点弧角 ϕ をパラメータとしている。外乱として、時刻 0.2 秒でタービンへの機械的入力を 0.4 pu ヘステップ状に変

化させる。ただし、発電機回転子角の初期値は $\pi/24$ rad。外乱により回転子角が約 1.7 Hz で動揺する。しかし、点弧角 180° では更に約 25 Hz の振動が重畳してくる。これは SSR によるものであり、前述の検討と一致する。一方、TCSC の点弧角をさげ、 170° にすると、SSR はほとんどみられなくなる。次に 163° にすると約 16 Hz の振動が重畳し、SSR が再び現れてくる。最後に点弧角を 155° にすると SSR は消える。

以上のように、TCSC では点弧角により SSR が現れたり消えたりする。逆に、点弧角を調整することにより SSR を避けることができる。では、なぜこのようなことが可能なのであろうか。以下で、その理由について検討する。

4. TCSC の周波数特性

SSR は(12)式が満たされるときに起きると予想される。しかし、発電機タービン軸系の固有振動数はほとんど変化しない。従って、送電系統における電氣的な固有振動数の変化が問題となる。本章では、TCSC のインピーダンスの周波数特性に基づいて電氣的固有振動数の変化を調べる。

図5のように TCSC を電流源により駆動する。電流源の電流 i には、基本波 (60 Hz) に周波数 f の成分が重畳しているものとする。すなわち、

$$i = i_0 \sin 120\pi t + i_f \sin 2\pi f t \quad (13)$$

ただし、 i_0 ：基本波の振幅、 i_f ：重畳成分の振幅
定常状態に達した後、コンデンサに誘起する電圧 v_c をフーリエ解析すると、周波数 f の電圧成分 v_f が得られる。

$$v_f = v_{f1} \sin 2\pi f t + v_{f2} \cos 2\pi f t \quad (14)$$

ただし、 v_{f1}, v_{f2} ：電流源と同相および進相な電圧成分の振幅

これより、TCSC の周波数 f におけるインピーダンス $z(f)$ を次式により求める。

$$\begin{aligned} z(f) &\equiv r(f) + jx(f) \\ &= v_{f1}/i_f + jv_{f2}/i_f \quad (15) \end{aligned}$$

ただし、 $r(f), x(f)$ ：周波数 f における抵抗およびリアクタンス

図6に TCSC のインピーダンスの周波数特性を示す。点弧角 ϕ を 5° ずつ変える。(13)式の i_0, i_f はそれぞれ 1, 0.02 pu である。ただし、 $\phi=175, 170^\circ$ では $i_f=0.02$ pu にすると、周波数によっては動作が不安定になるため、 $i_f=0.002$ pu とした。なお、他の点弧角で i_f を 0.002 pu にすると、特性は変わらないが、ばらつきが大きくなる。図から明らかなように、周波数特性は点弧角によって大きく変化する。リアクタンスについてみると、点弧角が 180° のときはコンデンサの特性となる。すべての周波数で容量性リアクタンスであり、低い周波数で大きな値を示す。点弧角 170° でも常に容量性であるが、周波数が低くなると 0 に近づく。一方、点弧角 165° では周波数が低い領域で誘導性リアクタンスとなる。更に点弧角が小さくなると誘

図5 周波数特性の算出

Fig. 5. Calculation of frequency characteristics.

(a) 抵抗

(b) リアクタンス

図6 TCSC の周波数特性

Fig. 6. Frequency characteristics of TCSC.

図7 送電系統の周波数特性

Fig. 7. Frequency characteristics of transmission system.

導性の領域が広がる。なお、60 Hz におけるリアクタンスは図の点弧角の範囲では常に容量性で、かつその値は点弧角が小さくなるにつれて大きくなる。ただし、点弧角 140° 以下では誘導性リアクタンスになる。抵抗はすべての周波数で正である。60 Hz ではどの点弧角でも小さいが、誘導性から容量性に変わる周波数域では大きな値を示す。

次に、送電線と TCSC を合わせた送電系統の周波数特性を図 7 に示す。点弧角は図 4 と同じである。まず、点弧角が 180° のときを見ると、リアクタンスは周波数とともに容量性から誘導性変わっていく。周波数が 34.6 Hz でリアクタンスは 0 になり、この値は(11)式の電氣的固有振動数と一致する。従って、SSR はリアクタンスが 0 となる共振点でおきることがわかる。次に、点弧角を 170° とすると、共振点は 37.8 Hz に移動する。この点ではいずれの軸振動モードとも共振を起こさない。しかし、点弧角が 163° になると、電氣的共振点は 43.9 Hz に移り、15.7 Hz の軸振動モードと共振を起こす。更に、点弧角を 155° にすると、電氣的共振点は 52.4 Hz に移り、どの軸振動モードとも共振は起こさない。

以上のように、TCSC 補償系統では電氣的な共振点(point)が点弧角によって変化していくことが、SSR の有無に大きく関与していることがわかる。しかし、従来の直列コンデンサ補償系統では(11)式により容易に電氣的な固有振動数を求めることができるのに対し、TCSC はサイリスタのような非線形素子を要素としてもつため電氣的固有振動数を求めることが困難である。次に、TCSC を線形素子からなる等価回路により表現することを考える。

5. TCSC の等価回路

TCSC を図 8 のような等価回路で表現することを考える⁽¹⁰⁾。この回路はコンデンサと並列に抵抗とリアクトルを入れたものであり、TCSC からサイリスタを取り除い

図 8 TCSC の等価回路
Fig. 8. Equivalent circuit of TCSC.

表 4 等価回路のパラメータ
Table 4. Parameters of equivalent circuit (pu).

点弧角	C_e	L_e	r_e
180°	0.008840	∞	∞
175°	0.008840	0.027160	4.80000
170°	0.009459	0.008148	1.16000
165°	0.010166	0.002988	0.34000
163°	0.010608	0.002309	0.20000
160°	0.011934	0.001494	0.10000
155°	0.014232	0.000918	0.01400
150°	0.016646	0.000578	0.00883
145°	0.016239	0.000472	0.00180

た形となっている。TCSC はサイリスタによりリアクトルに流れる電流を調整することで、そのリアクタンスを調整しているとみなせるので、妥当な等価回路になっていると思われる。

等価回路のインピーダンスは

$$Z = \frac{1}{j\omega C_e + \{1/(r_e + j\omega L_e)\}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

(a) 点弧角 170°

(b) 点弧角 163°

(c) 点弧角 155°

図 9 等価回路の周波数特性
Fig. 9. Frequency characteristics of the equivalent circuit.

で与えられる。パラメータ C_e, L_e, r_e は TCSC の周波数特性に合うように選定する。表 4 に点弧角における等価回路のパラメータを示す。点弧角が 180° のときはリアクトルに電流が流れないため、等価な L_e, r_e は ∞ となる。点弧角を小さくするとリアクトルに流れる電流が増えるため、 L_e, r_e の値は小さくなり、逆に C_e の値は大きくなっていく。

図 9 に等価回路のインピーダンスの周波数特性を示す。点弧角が 170° と 163° のときは TCSC の周波数特性とよく一致しているが、 155° ではリアクタンスが誘導性から容量性へ変化するところで差が見られる。これは 60 Hz および容量性の周波数領域で特性が合うよう抵抗 r_e を小さくしたためである。 r_e を 0.014 pu から 0.030 pu に変更すると全体的な形はよく合う。しかし、送電系統全体の特性では容量性の領域が重要であるため、表 4 のパラメータを使用する。

送電線と TCSC を合わせると、全体のインピーダンスは

$$Z = r_0 + j\omega L_0 + \frac{1}{j\omega C_e + \{1/(r_e + j\omega L_e)\}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。右辺を整理すると、分子は

$$r_0 + r_e - \omega^2 C_e (r_0 L_e + r_e L_0) + j\omega \{(L_0 + L_e) + C_e (r_0 r_e - \omega^2 L_0 L_e)\}$$

となる。これより、リアクタンスが 0 になる周波数 f_e を求めると

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_0 + L_e + r_0 r_e C_e}{L_0 L_e C_e}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

が得られる。表 4 の値から f_e を求めると、点弧角 $180^\circ, 170^\circ, 163^\circ, 155^\circ$ における値はそれぞれ 34.6, 38.5, 45.3, 51.8 Hz となり、図 7 の値とよく一致する。

6. 等価回路による解析

図 10 は等価回路によってシミュレーションを行った結果である。系統の方程式は (1)～(3) 式で $r \rightarrow r_e, L \rightarrow L_e, C \rightarrow C_e$ とし、サイリスタを常に導通状態とすればよい。TCSC による図 4 と同様、点弧角 180° と 163° でそれぞれ 25.5 Hz と 15.7 Hz の軸振動に対応する SSR が現れ、点弧角 170° と 155° では消えている。このことから、図 8 の等価回路によって TCSC と同じ応答が得られることが確認された。従って、TCSC は図 8 の回路とほぼ等価であり、点弧角によりそのパラメータが変化していくものとしてとらえることができる。

次に等価回路により SSR の固有値解析を行う。シミュレーションによる解析はかなり時間を必要とするが、図 8 の等価回路を使えば容易に解析ができる。方程式 (1)～(3) は瞬時波形に対するものであるが、実効値へ変換すると次のようになる (付録参照)。すなわち、

$$\frac{di}{dt} = \frac{v - v_b - v_c - r_0 i - j\omega_0 L_0 i}{L_0} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{i - i_l - j\omega_0 C_e v_c}{C_e} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{v_c - r_e i_l - j\omega_0 L_e i_l}{L_e} \quad \dots\dots\dots (21)$$

ただし、電圧電流は $i = i_d + j i_q, i_l = i_{ld} + j i_{lq}, v = v_d + j v_q, v_b = v_{bd} + j v_{bq}, v_c = v_{cd} + j v_{cq}$ のように、すべて複素数となる。添字 d, q はそれぞれ d, q 軸成分であることを示す。式 (19)～(21) と式 (4)～(10) を線形化し、固有値解析を行う。

表 5 に固有値解析の結果を示す。点弧角が 180° のときは、軸振動モード 3 に対する固有値の実部が 1.468 であり、不安定であることがわかる。これはシミュレーションの結果と一致する。モード 5 の実部も正であるが、その値は小さい。モード 7 は電気的な固有振動に対応している。

図 10 等価回路によるシミュレーション
Fig. 10. Simulations with the equivalent circuit.

表 5 等価回路による固有値解析
Table 5. Eigenvalue analysis with the equivalent circuit.

モード	点弧角 180°	点弧角 170°
1	-0.011 + j 47.456	-0.011 + j 47.456
2	-0.011 + j 32.252	0.048 + j 32.274
3	1.468 + j 25.497	0.229 + j 25.526
4	-0.106 + j 20.229	-0.051 + j 20.228
5	0.006 + j 15.853	0.133 + j 15.861
6	-0.015 + j 1.643	0.006 + j 1.697
7	-5.791 + j 25.346	-17.173 + j 22.849

モード	点弧角 163°	点弧角 155°
1	-0.011 + j 47.456	-0.011 + j 47.456
2	0.013 + j 32.297	-0.025 + j 32.306
3	0.014 + j 25.552	-0.028 + j 25.560
4	-0.089 + j 20.212	-0.118 + j 20.215
5	0.756 + j 15.783	-0.008 + j 15.743
6	0.078 + j 1.705	0.156 + j 1.822
7	-24.598 + j 15.462	-6.890 + j 8.152

ただし、虚数部の単位は Hz。

周波数が25.3 Hzでありモード3と共振している。点弧角を170°にするとモード7の周波数は22.8 Hzとなり、モード3との共振が小さくなる。このためモード3の実部が0.229に減少している。不安定であるが、その値が小さいため、シミュレーションの時間域では、軸振動は確認できない。軸振動が顕在化するの図4、図10とも10秒あたりからである。点弧角163°では、モード7の周波数が15.4 Hzとなり、モード5の軸振動と共振を起こす。このため、モード5の実部は0.756と大きくなっている。点弧角155°ではモード7の周波数が8.1 Hzとなるため、軸振動モードはすべて安定である。ただし、電力動揺に対応するモード6が不安定になっている。この傾向はシミュレーション結果にもみられる。

以上、等価回路によって固有値解析を行ったが、シミュレーションに対応する結果が得られた。大規模な系統で瞬時波形シミュレーションを行うのは非常に困難である。図8のような等価回路によって固有値解析を行えば計算量を大幅に削減することができる⁽¹¹⁾。

7. ま と め

本論文では、TCSC補償系統におけるSSRについて検討した。その結果を以下にまとめる。

(1) まず、サイリスタの点弧角を変えると、SSRが現れたり消えたりすることをシミュレーションにより確認した。

(2) 次に、TCSCのインピーダンスの周波数特性がサイリスタの点弧角によって大きく変化することを示した。

(3) また、送電系統全体のインピーダンスの特性からSSRの有無が決まること、および点弧角の変更により共振周波数を変えることでSSRを回避しうることを示した。

(4) TCSCの等価回路をインピーダンスの周波数特性に基づいて定めた。また、この等価回路によってシミュレーションを行い、SSRが周波数特性によって起きることを確認した。

(5) 最後に、等価回路によって固有値解析を行い、その結果より等価回路によって解析を行うことの妥当性を確かめた。等価回路の使用により大規模な系統の解析が可能となる。

以上、本論文ではTCSCのSSR回避作用の解明とその等価回路の導出を行った。

(平成8年3月27日受付、同8年7月29日再受付)

文 献

- (1) N. G. Hingorani: "Flexible ac transmission", IEEE spectrum, April, 40 (1993)
- (2) IEEE Committee Report: "Countermeasures to subsynchronous resonance problems", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-99, 1810 (1980)
- (3) S. Nyati, et al.: "Effectiveness of thyristor controlled series capacitor in enhancing power system dynamics: an analog

simulator study", IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-9, 1018 (1994)

- (4) R. A. Hedin, S. Weiss, D. Torgerson & L. E. Eilts: "SSR characteristics of alternative types of series compensation schemes", IEEE Trans. Power Systems, PWRD-10, 845 (1995)
- (5) D. L. Dickmader & S. Rudin: "Simulator verification of thyristor controlled series capacitor SVR (synchronous voltage reversal) scheme", Proc. Stockholm Power tech Conference, Power Electronics, 115 (1995)
- (6) W. Zhu, et al.: "An EMTF study of SSR mitigation using the thyristor controlled series capacitor", IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-9, 1479 (1995)
- (7) H. A. Othman & L. Ångquist: "Analytical modeling of thyristor controlled series capacitors for SSR studies", IEEE Trans. Power Systems, PWRD-11, 119 (1996)
- (8) S. G. Jalali, R. H. Lasseter & I. Dobson: "Dynamic response of a thyristor controlled switched capacitor", IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-9, 1609 (1994)
- (9) IEEE Committee Report: "First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-96, 1565 (1977)
- (10) 二宮・横山・関根:「可変直列コンデンサ補償系統の電氣的特性についての検討」, 平5電気学会全大, 1158
- (11) 垣本・飯田:「TCSC補償系統におけるSSRの解析」, 電気学会電力技術研資, PE-95-80 (平7)

付 録

(19)～(21)式の導出

例えば、電流 i の瞬時値を

$$i = \sqrt{2} i_0 \sin \omega_0 t \dots\dots\dots (付1)$$

ただし、 i_0 : i の実効値

とおく。いま、 i を時間微分すると

$$\frac{di}{dt} = \sqrt{2} \frac{di_0}{dt} \sin \omega_0 t + \sqrt{2} \omega_0 i_0 \cos \omega_0 t \dots\dots\dots (付2)$$

となる。上式右辺の第1項は i と同相、第2項は i より90°進相である。これより瞬時値における微分作用素 d/dt は実効値では $(d/dt) + j\omega_0$ となるのがわかる。従って、瞬時値に対する方程式を実効値に関する式へ変換するには

$$\frac{d}{dt} \rightarrow \frac{d}{dt} + j\omega_0 \dots\dots\dots (付3)$$

と置き換えればよい。上の変換を(1)～(3)式において行えば(19)～(21)式が得られる。式の変形は簡単であるので省略する。

垣 本 直 人 (正員) 1952年7月26日生。1980年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月広島大学工学部助手。1986年4月京都大学工学部講師、現在に至る。主として、電力系統の安定性に関する研究に従事。工学博士。IEEE会員。

飯 田 章 弘 (正員) 1972年12月18日生。1995年京都大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学院工学研究科電気工学専攻修士課程進学、現在に至る。電力系統のSSRに関する研究に従事。

関 守 弘 (非会員) 1972 年 12 月 17 日生。1996 年 3 月京都大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月住友電気工業(株)入社。

宅 間 董 (正員) 1938 年 9 月 30 日生。1966 年東京大学大学院博士課程修了。同年同大学電気工学科講師。1967 年(財)電力中央研究所入所。高電圧、放電、電磁界解析、核融合の研究に従事。1989～93 年九州大学客員教授。1995 年 3 月から京都大学工学部(現在、工学研究科)教授。工学博士。1975 年英国電気学会 Maxwell 賞, 81, 91 年電気学会著作賞, 92 年同業績賞受賞。

IEEE Fellow。

箕 山 和 也 (正員) 1970 年 7 月 1 日生。1989 年 3 月大阪府立茨木工業高校電子工学科卒業。同年 4 月関西電力(株)入社。大阪北支店小曾根電力所制御通信課勤務。1994 年 4 月～96 年 3 月京都大学工学部聴講生。同年 4 月復職。