超電導エネルギー貯蔵装置による電力システムの制動係数の測定

正員 白井 康之 (京都大)
 正員 仁田 旦三 (東京大)
 非会員 下田 一彦 (京都大)

Measurement of Damping coefficient of Electric Power System
 by use of Superconducting Magnet Energy Storage

Yasuyuki Shirai, Member (Kyoto University)

Tanzo Nitta, Member (The University of Tokyo)

Kazuhiko Shimoda, Non-Member (Kyoto University)

In this paper, a new application of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) for diagnosis of power systems is proposed. Basic experiments for measurement of damping coefficient of power systems by use of SMES are carried out in an experimental system with a small generator, artificial transmission lines and a small SMES. The SMES gives small power disturbances to the power system without affecting operating conditions of the power system. The small power oscillations in the power system due to continuous power disturbances generated by SMES are observed. The relations among the damping coefficient, the power disturbances and the power change of SMES are discussed for one-machine infinite-bus system. The damping coefficients of the power system are obtained by investigating the oscillations due to the sinusoidal power change of SMES. The possibility of estimation of the steady state power system stability by monitoring the damping coefficients of the operated power system by use of SMES can be shown experimentally.

キーワード：電力系統, 制動係数, 超電導エネルギー貯蔵

1. はじめに

電力系統において系統の運転状態を把握することは、系統の設計または運用上、有効なことである。その方法として、負荷変動や発電機出力変化などの過渡的な電力変動を系統に与え、その応答を解析することによって推定する方法があるが、これら過渡応答による方法では系統自身の運転状態を変えることによって電力動揺を発生させているため、その運転状態における系統状態を組織的に測定することは難しいと思われる。系統条件を変えることなく外部から微小な定常的な既知の電力変動を与えることができれば、これによる電力系統の定常的な応答を調べることによって、その系統状態を組織的に推定できるものと思われる。

一方、超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES) は、単にエネルギー貯蔵のみならず様々な特徴をもつ電力機器であり、電力系統安定化、電圧安定度向上等への有効利用法が期待されている。SMES の電力系統への新たな応用がさらに見い出せれば SMES の有用性は高まり、電力系統への導入の可能性は大きくなるものと思われる。

このような背景から、SMES の電力系統への新たな応用

の一つとして、SMES による電力系統の運転状態の把握を提案する。SMES は高インピーダンス、低損失であり、その設置による系統条件の変化は小さい。また制御応答が速いため、様々な大きさ、周波数の電力変動をある程度自由に発生させることができる。この特性を利用して、SMES から電力系統に微小な既知の電力変動を与え、その応答を解析することによって電力系統の運転状態を把握することを考える。

この考えに基づいて、一機無限大母線系統に小型 SMES を設置し、SMES に微小な正弦波状の有効電力を吸収放出させて、電力系統をわずかに励振し、その応答を観測・解析して運転中の電力系統の固有周波数を測定した。さらに様々な系統条件下で電力動揺実験を行ない、運転中の系統の定常安定度の評価を行えることを示した⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

本稿では、SMES の電力変動によって系統に誘起される電力動揺を、SMES による系統安定化制御によって抑制しつつ、その際の応答を解析することによって、系統の制動係数を測定できる可能性を示した。すなわち、通常オフラインの計算で得ていた定常運転時の電力系統の制動係数を、SMES

を用いて運転中の電力系統から求める実験を行ない、若干の考察を行なった。ここではその結果について報告する。

2. SMES の電力変動と電力系統の動揺

SMES から電力系統に対して電力変動を与え、それによって系統の制動係数を測定する際には、系統条件を変えることなく、また系統に与える影響をできる限り小さくして測定を行なうことが望ましい。まず SMES の電力変動が外部強制項として系統に与える影響を把握しておく。図 1 のような一機無限大母線系統において、SMES の電力変動と電力系統に誘起される電力動揺との関係について検討する。

図 1 一機無限大母線系統

Fig. 1. One-machine and infinite-bus system.

〈2・1〉 SMES の電力変動 一機無限大母線系統において支配的となる振動モードは、次式から決まる ($F = 0$)。

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} + K_1 \delta = F \quad (1)$$

- $\delta(t)$: 内部相差角 [rad]
- ω_n : 定格角速度 [rad/sec]
- $M = \frac{M_0}{\omega_n}$: M_0 : 慣性定数 [kW · sec]
- $D = \frac{D_0}{\omega_n}$: D_0 : 制動係数 [kW]
- K_1 : 同期化力 [kW/rad]
- F : SMES による電力擾乱 [kW]

初期運転状態を示す内部相差角の初期値は同期化力 K_1 に含まれる。そこでこの系統に SMES を接続し、SMES の有効電力を外部入力信号によって次式のように正弦波状に変化させ、系統に対して一定の振幅、周波数を持った正弦波状の電力変動を与える。またこれと同時に、SMES の無効電力 Q_{sm} をゼロに制御して、力率一定で同時制御する。

$$P_{sm} = P_0 \sin(2\pi f_{sm} t) \quad (2)$$

P_0 : 電力変動振幅 f_{sm} : 電力変動周波数

このとき P_0 が小さい範囲では P_{sm} は M 、 D 、 K_1 に影響を与えない外部入力と考えることができ(3)、出力発電機への外部入力 F は、次式で表わされる。

$$F = \left(\frac{E_0}{V_{t0}} \right)^2 \frac{x_2}{x_1 + x_2} P_{sm} \quad (3)$$

ここで、 E_0 : 過渡リアクタンス背後電圧、 V_{t0} : SMES 設置端電圧、 $x_1 = x'_d + x_{l1}$ 、 $x_2 = x_{l2}$ 、 x'_d は d-軸過渡リアクタンス、 x_{l1} 、 x_{l2} は送電線リアクタンスである。

これは、SMES の電力変動が、SMES から見た系統のインピーダンスの逆比に応じて、発電機側と無限大母線側に分配されることを示している。SMES から系統に対して(2)式のような定常的な電力変動を与えることは、(1)式の右辺に、系統に依存しない外部強制項 F が加わることに相当する。

〈2・2〉 SMES の電力変動と電力系統の制動係数 (1) ~ (3) 式の解は一般的に

$$\Delta \delta = a e^{-\frac{D}{2M} t} \cos(\omega'_1 t + \alpha) + A \sin(\omega_{sm} t - \phi) \quad (4)$$

と表される。但し、 a 、 α 、 A 、 ϕ は定数であり、 $\omega_1 = 2\pi f_1$ 、 f_1 は固有周波数、 $\omega_{sm} = 2\pi f_{sm}$ は SMES の励振電力角周波数、 $\omega'_1 = \omega_1 \sqrt{1 - \frac{D^2}{4K_1 M}}$ である。右辺第 1 項は、系統の制動力によって指数関数的に減衰していく減衰振動項であり、第 2 項は SMES による強制振動項である。SMES の電力変動振幅 P_0 及び電力変動周波数 f_{sm} と、発電機角速度偏差 $\Delta \omega$ の励振周波数成分の振幅 $|\Delta \omega|$ との間に、次のような関係式が導かれる。

$$|\Delta \omega| = \frac{1}{M} \left(\frac{E_0}{V_{t0}} \right)^2 \frac{x_2}{x_1 + x_2} \frac{\omega_{sm}}{\sqrt{(\omega_1^2 - \omega_{sm}^2)^2 + \left(\frac{D}{M} \right)^2 \omega_{sm}^2}} P_0 \quad (5)$$

(5) 式より、SMES の電力変動振幅 P_0 及び周波数 f_{sm} を一定にした場合、 $|\Delta \omega|$ は ω_1 と D の関数になる。ここで $\frac{D}{2M} \ll \omega_1$ とみなせるので、(5) 式右辺の平方根内の第 1 項 $(\omega_1^2 - \omega_{sm}^2)^2$ の $|\Delta \omega|$ に及ぼす影響が、第 2 項 $\left(\frac{D}{M} \right)^2 \omega_{sm}^2$ の $|\Delta \omega|$ に及ぼす影響に比べてかなり大きいことが分かる。従って系統の制動係数 D を系統動揺から測定する場合は、 ω_1 が $|\Delta \omega|$ に及ぼす影響を小さくする、すなわち ω_{sm} を ω_1 と等しくする必要がある。しかし ω_{sm} を ω_1 に設定して系統をその固有周波数で励振した時、系統の制動係数が小さい場合には系統動揺が拡大していく可能性があり、安全な測定ができないばかりでなく、系統の安定運転に支障が生じることがある。一方、SMES による系統安定化制御を行なった場合、SMES を含めた系統全体の制動係数が大きくなるため、 ω_{sm} を ω_1 と等しくすることが可能となると考えられる。そこで、 ω_{sm} を ω_1 に等しく設定して SMES から系統に対して電力変動を与え、それによって系統に誘起される動揺を SMES による系統安定化制御によって抑制しつつ、系統の制動係数を測定することを考える。

3. SMES による系統安定化制御と系統の制動係数

〈3・1〉 SMES による系統安定化制御 図 1 のような一機無限大母線系統において SMES による系統安定化制御を行う場合、SMES に吸収、放出される有効電力を次式に

よって与えることにより系統に生じた電力動揺を抑制する。

$$P_A = P_{sm} + k_{sm}\Delta\omega \quad (6)$$

k_{sm} は安定化制御ゲインである。ここで SMES の有効電力設定値 P_{sm} として (2) 式のような正弦波状の信号を与えて系統を励振し、系統安定化制御によってその動揺を抑制しつつ、系統の制動係数を測定する。

〈3・2〉 電力系統の制動係数 SMES による系統安定化制御を行っている場合、SMES から系統に放出される有効電力 P_A は、

$$P_A = P_0 \sin \omega_{sm} t + k_{sm} \Delta\omega \quad (7)$$

と表される。 $\Delta\omega$ の振動周波数が SMES の電力変動角周波数 ω_{sm} となるように ω_{sm} を設定するので、この電力変動によって SMES から発電機に対して与えられる外力は、 P_{sm} と同じ周波数で、 P_{sm} に対して θ だけ位相が遅れた電力変動と考えられる。その外力 F を

$$F = F_0 \sin(\omega_{sm} t - \theta) \quad (8)$$

とおく。これを (1) 式の発電機の動揺方程式の外部入力 F に代入し、定常的な応答として (4) 式の強制振動項に着目すると、次式が得られる。

$$\Delta\omega = A\omega_{sm} \cos(\omega_{sm} t - \phi) \quad (9)$$

$$= |\Delta\omega| \cos(\omega_{sm} t - \phi) \quad (10)$$

(7) 式に (10) 式を代入すると、SMES の有効電力変動は次式のようにになる。

$$P_A = A_1 \sin(\omega_{sm} t - \theta) \quad (11)$$

但し、

$$A_1 = \sqrt{(P_0 + k_{sm} |\Delta\omega| \sin \phi)^2 + (k_{sm} |\Delta\omega| \cos \phi)^2} \quad (12)$$

$$\tan \theta = \frac{k_{sm} |\Delta\omega| \cos \phi}{P_0 + k_{sm} |\Delta\omega| \sin \phi} \quad (13)$$

であり、2 節の (3) 式の SMES の有効電力 P_{sm} は P_A に、その振幅である (5) 式の P_0 は A_1 に対応するので、SMES の電力変動振幅 A_1 とそれによる発電機への外力 F の振幅 F_0 の間には、次の関係がある。

$$F_0 = \left(\frac{E_0}{V_{t0}} \right)^2 \frac{x_2}{x_1 + x_2} A_1 \quad (14)$$

ここで SMES の電力変動周波数を系統の固有周波数に等しく設定した場合 ($f_{sm} = f_1$)、 A 、 ϕ が次式のように求められる。

$$A = \frac{F_0}{D\omega_{sm}} \quad (15)$$

$$\tan \phi = -\frac{1}{\tan \theta} \quad (16)$$

(16)、(13) を満たす解の内、意味を持つ解は $\sin \phi = -1$ と求められる。したがって、(15) 式、(12) 式、(14) 式より A 、 ω_{sm} 、 A_1 、 F_0 を消去すると、系統の制動係数 D が次式のように求められる。

$$D = \left(\frac{E_0}{V_{t0}} \right)^2 \frac{x_2}{x_1 + x_2} \frac{P_0}{|\Delta\omega|} - \left(\frac{E_0}{V_{t0}} \right)^2 \frac{x_2}{x_1 + x_2} k_1 \quad (17)$$

右辺第 2 項は SMES の制動係数 D_{sm} に相当し、第 1 項は SMES を含めた系統全体の制動係数 D_A に相当することから、(17) 式は次式のように表すことができる。

$$D = D_A - D_{sm} \quad (18)$$

SMES の電力変動振幅 P_0 、安定化制御ゲイン k_{sm} は既知であることから、発電機角速度偏差の振幅 $|\Delta\omega|$ を測定すれば、(18) 式から系統の制動係数の変化を測定することができる。

4. 実験系統と実験方法

〈4・1〉 実験系統 実験系統図を図 2 に示す。なお、模擬送電線のインピーダンスは、6kVA、220V を基準にしている。発電機は 6kVA、220V、4 極同期発電機である。使用した発電機の定数を表 1 に示す。発電機は界磁電流を一定

図 2 実験系統の概略図

Fig. 2. Schematic configuration of experimental system.

表 1 供試発電機定数

Table 1. Machine constants of test generator

直軸同期リアクタンス	x_d	49.6%
横軸同期リアクタンス	x_q	76.1%
逆相リアクタンス	x_2	25.0%
零相リアクタンス	x_0	8.65%
直軸過渡リアクタンス	x'_d	31.5%
直軸初期過渡リアクタンス	x''_d	25.4%
横軸初期過渡リアクタンス	x''_q	30.1%
電機子時定数	T_a	0.024 sec
短絡初期過渡時定数	T'_d	0.012 sec
開路時定数	T'_{do}	0.434 sec
短絡過渡時定数	T'_d	0.104 sec
はずみ車効果	GD^2	5.0 kg·m ²

にして運転した場合において実験を行なった。なお、発電機に AVR、ガバナは使用していない。

SMESは、インダクタンス 10.8 H、定格電流 140 A の超電導マグネットを容量 6kVA の 2 台の変圧器と変換器 (ダブルサイリスタブリッジ) を介して模擬送電線に接続し、有効無効電力同時制御が可能となっている。

〈4・2〉 実験の事前検討 SMES の電力変動周波数 f_{sm} について考える。 f_{sm} を系統の固有周波数 f_1 に近い周波数に選んだ場合には、(5) 式の制動係数 D を無視すると $|\Delta\omega|$ が無限大になることがわかる。発電機出力 2.0kW、界磁電流 3.2A で、SMES から系統に対して $P_0 = 200$ W、 $f_{sm} = 0.79$ Hz の電力変動を与えたときの P_g 、送電線電力 P_L の動揺波形を図 3 に示す。なお、この場合の系統の固有周波数を概算すると、0.80Hz である。系統には大きい動揺が励振

安定化制御なしの場合の動揺波形

安定化制御ありの場合の動揺波形

図 3 SMES の安定化制御と電力動揺波形

Fig. 3. Power oscillations of generator and line with and without stabilizing control of SMES.

されており、不安定である。系統の制動係数を測定する場合は、 f_{sm} を f_1 に設定する必要があるため、SMES による系統安定化制御を行うことによって系統動揺を抑制しつつ、測定を行う。そこで SMES による安定化制御を行なった上で、同様にして $f_{sm} = 0.79$ Hz の電力変動を与えたとき

の動揺波形を図 3 に示す。安定化制御を行なった場合、 f_{sm} を f_1 に設定しても動揺は拡大することなく、系統に大きい擾乱を与えることなく安全な測定ができることを示している。

5. SMES による電力系統の制動係数測定実験

〈5・1〉 SMES の電力変動周波数の決定方法 系統の制動係数を測定する為には、前述したように SMES の電力変動周波数 f_{sm} を系統の固有周波数 f_1 と等しくする必要がある。 $f_{sm} = f_1$ とした場合、(13)、(16) 式から $\phi = -\frac{\pi}{2}$ 、 $\theta = -\pi$ が得られる。これは、SMES の有効電力 P_{sm} と発電機角速度偏差 $\Delta\omega$ が逆位相になることを示している。

発電機出力 $P_g = 2.0$ kW、SMES の安定化制御ゲイン $k_{sm} = 2000$ J/rad として、 $f_{sm} = 1.0, 0.83, 0.80$ Hz とした場合の P_{sm} と $\Delta\omega$ の動揺波形を図 4 に示す。なお、実

図 4 f_{sm} による P_{sm} と $\Delta\omega$ の位相関係の変化

Fig. 4. Phase relations between P_{sm} and $\Delta\omega$ for f_{sm} .

線が P_{sm} 、破線が $\Delta\omega$ であり、この場合の固有周波数は 0.80Hz である。図から f_{sm} を f_1 に近づけていくにつれて、 $\Delta\omega$ が P_{sm} に対して逆位相になっていく様子がモニターできることが分かる。このとき、周波数の変化に対して固有周波数の前後で大きく位相が変化するので、非常に感度良く電力変動周波数を固有周波数に設定することができる。このように P_{sm} と $\Delta\omega$ の波形をモニターしながら f_{sm} を変化させ、両波形が逆位相となった時点で系統の微小動揺を測定すれば、系統の制動係数が測定できる。

〈5・2〉 系統の制動係数の測定結果 発電機を界磁電流一定運転 ($I_f = 3.2\text{A}$) した場合に、SMES の安定化制御ゲイン $k_{sm} = 2000\text{ J/rad}$ として、発電機出力 P_g を変えて $|\Delta\omega|$ を測定し、(17) 式から系統の制動係数 D を求めた結果を図 5 に示す。

図 5 系統の制動係数

Fig. 5. Damping coefficient of power system.

また図中に、 D に SMES の制動係数 D_{sm} を付加した系統全体の制動係数 D_A を併せて示す。なお、p.u. 値は 6kVA、220V が基準であり、角速度に関しては $1\text{p.u.} = 2\pi f_n \text{ rad/sec}$ ($f_n = 60\text{Hz}$) とした。図 5 から、発電機出力を大きくすると、電機子反作用の影響により、系統の制動係数 D が相対的に大きくなっていくことが分かる。また SMES の安定化機能により、系統全体の制動係数が大きくなることが確認できる。これは、SMES の電力変動周波数を系統の固有周波数に等しく設定した場合にも、系統に誘起された動揺が拡大することなく測定ができていていることを示している。

参考のために制動係数の発電機出力に対する変化の概略の様子を界磁電圧一定とした界磁回路まで考慮して概算した。計算の方法は付録に示す。この概算値と実験結果とを比較したのが図 6 である。

発電機出力に対する制動係数の変化の様子はほぼ一致している。測定値と概算値の差は、界磁鎖交磁束一定とした時の制動係数 (付録に示す D_0 に相当する) が主要要因と考えられる。発電機出力 4 kW では差が大きくなっているが、これは系統の状態が定常安定度限界に近く、概算値の計算方法では系統を十分表現できていないためと考えられる。

〈5・3〉 SMES の励振電力振幅と制動係数 SMES の励振電力振幅 P_0 を 100W、200W と変えて、同様にして制動係数 D を測定した。この結果を図 7 に示す。測定した制動係数は、 P_0 にかかわらずほぼ一致した。これは、この測定法の妥当性を示している。

〈5・4〉 SMES の安定化制御と制動係数 発電機を界磁電流一定運転、発電機出力を 1kW、3kW の場合について

図 6 制動係数の概算値との比較

Fig. 6. Measured and rough-calculated damping coefficients.

図 7 SMES の励振電力振幅と制動係数

Fig. 7. Damping coefficient versus amplitude P_0 of power oscillation of SMES

SMES の安定化制御ゲイン $k_{sm} = 4000\text{ J/rad}$ として、同様の実験を行い制動係数 D を測定した。

図 8 に測定した制動係数 D の結果を示す。 $k_{sm} = 2000, 4000\text{ J/rad}$ とした場合の、系統全体の制動係数 D_A を図に併せて示す。安定化制御ゲイン k_{sm} を変えて測定した制動係数 D はほぼ一致していることから、 k_{sm} の値に関わらず、 D が測定できることがわかる。 D_A と D を比較することで、SMES の安定化制御による制動効果分 D_{sm} がかなり大きいことが分かる。

更に、この測定方法の妥当性を検証するため、 $k_{sm} = 0$ として安定化制御を行わずに D を直接的に測定した。この

とき、系統動揺が拡大する恐れがあったため、 $P_0 = 50\text{W}$ として系統に与える影響を小さくして測定を行なった。制動係数の測定結果を図9に示す。図には図8の実験結果も併せて示してある。発電機出力が1.3 kWの2ケースの比較であるが、安定化制御を行ない測定した結果とこれを行わずに測定した結果がほぼ一致した。この結果は、SMESの安定化制御にかかわらず SMES の安定化制御のない状態の系統の制動係数が測定できていることを示している。また、SMES の安定化制御による制動効果分 D_{sm} が (17) 式の右辺第2項で評価できること、すなわち SMES の制動係数に与える効果を自己評価できることも実験的に示している。

図8 安定化制御ゲインと制動係数

Fig. 8. Damping coefficient versus power stabilizing control gain k_{sm} of SMES

6. まとめ

本研究では、超電導エネルギー貯蔵装置の電力系統への応用例として、電力系統に対して定常的な既知の電力変動を与えることによって電力系統の制動係数を測定する装置として用いた場合について検討を行った。

また、SMES による安定化制御によって電力動揺を抑制しつつ、その際の応答から系統の制動係数を測定できる可能性を示した。

以下に簡単にまとめる。

- 一機無限大母線系統において、SMES の電力変動と、それによって系統に誘起される電力動揺と系統の制動係数の関係について検討した。
- SMES の電力変動周波数を系統の固有周波数に等しく設定することで、系統の制動係数を測定できる方法を提案した。
- SMES を一機無限大母線系統に接続し、これを用いて様々な系統条件下で定常的な電力変動を与え、系統をその固有周波数で励振し、それに対する系統動揺から

図9 SMES の安定化制御と制動係数

Fig. 9. Damping coefficient with and without power stabilizing control of SMES.

系統の制動係数を測定した。

- 安定化制御機能を持つ SMES を用いて系統動揺を安定化しながら、電力系統の制動係数を測定できる可能性を示した。
- 提案した方法で系統の制動係数を測定することで、安定化制御機能を持つ SMES を設置することによる系統の制動係数に与える効果を自己評価もできる可能性を示した。

(平成7年8月18日受付、同8年1月22日再受付)

文 献

- 白井他, “超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の動揺周波数特性の測定”, 電気学会電力技術研究会資料, PE-90-60, 1990
- 白井他, “超電導エネルギー貯蔵装置を用いた電力系統の動揺特性の測定実験”, 電気学会電力技術研究会資料, PE-91-152, 1991
- 白井他, “超電導エネルギー貯蔵装置を用いた電力系統の特性解析実験”, 電気学会電力技術研究会資料, PE-92-101, 1992
- 白井他, “超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の動揺周波数特性の測定”, 電気学会電力技術研究会資料, PE-93-89, 1993
- 長尾, “電力系統の固有定態安定度”, 電中研技報, 73004, 1973

付 録

界磁電圧一定運転時の同期化係数と制動係数

一機無限大母線系統において関係式を微小変動分に対する線形近似を行い整理すると、付図1のようなブロック図、付

図2のようなベクトル図が得られる。ここで、定数 $K_1 \sim K_4$ は次式で与えられる。

付図1 一機無限大母線系統の同期発電機ブロック図
Fig. Appx. 1. Block diagram of one-machine infinite bus system.

$$K_1 = \frac{E_q}{x_q + x_e} V_\infty \cos \delta + \frac{x_q - x'_d}{(x_q + x_e)(x_d + x_e)} V_\infty^2 \sin^2 \delta \quad (\text{付1})$$

$$K_2 = \frac{1}{x'_d + x_e} V_\infty \sin \delta \quad (\text{付2})$$

$$K_3 = \frac{x'_d + x_e}{x_d + x_e} \quad (\text{付3})$$

$$K_4 = \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x_e} V_\infty \sin \delta \quad (\text{付4})$$

上式で、 x_e は送電線リアクタンスであり、 E_q はベクトル図から

付図2 一機無限大母線系統の同期発電機ベクトル図
Fig. Appx. 2. Vector diagram of one-machine infinite bus system.

$$E_q = V_\infty \cos \delta + V_\infty \sin \delta \tan \theta \quad (\text{付5})$$

と置き換えられるので、 $K_1 \sim K_4$ は、 δ, θ を与えれば任意の運転状態における値が計算できる。

相差角の微小変化に対するトルクの変化 ΔT_{eD} を求めると、

$$\begin{aligned} \Delta T_{eD} &\equiv \Delta T_e + \Delta T_D \\ &= K_1 \Delta \delta + D_0 \frac{\Delta \omega}{\omega_n} - \frac{K_2 K_3 K_4}{1 + s T_{d0}' K_3} \Delta \delta \\ &= \underbrace{(K_1 + K_1')}_{\text{等価的な同期化係数}} \Delta \delta + \underbrace{(D_0 + D_0')}_{\text{等価的な制動係数}} \frac{\Delta \omega}{\omega_n} \quad (\text{付6}) \end{aligned}$$

$$\omega_n = 2\pi f_n \quad f_n: \text{定格周波数 (60Hz)}$$

ここで、 $s = j\omega$ (ω は動揺角周波数)とすると、 K_1', D_0' は次式で表される。

$$K_1' = \frac{-K_2 K_3 K_4}{1 + (\omega T_{d0}' K_3)^2} \quad (\text{付7})$$

$$D_0' = \frac{\omega_n K_2 K_3^2 K_4 T_{d0}'}{1 + (\omega T_{d0}' K_3)^2} \quad (\text{付8})$$

以上から、発電機固有の同期化係数 K_1 、及び、制動係数 D_0 は、励磁系によって、等価的に $K_1 + K_1', D_0 + D_0'$ に変化する。上式にしたがって δ, θ, ω を与えて、 D_0 以外の概算値を求めることができる。

白井 康之

(正員) 昭和32年6月20日生。60年3月京都大学大学院博士課程修了。同年4月京都大学工学部助手、平成8年5月京都大学大学院エネルギー科学研究科助教授。現在に至る。工学博士。超電導エネルギー貯蔵、超電導発電機に関する研究に従事。低温工学会会員。

仁田 旦三

(正員) 昭和19年8月2日生。47年3月京都大学大学院博士課程修了。同年4月京都大学工学部助手、55年4月同助教授、平成8年4月東京大学大学院工学系研究科教授。現在に至る。工学博士。この間、回路網理論、グラフ理論の応用、超電導発電機、超電導エネルギー貯蔵、同期機に関する研究に従事。低温工学会会員。

下田 一彦

(非会員) 昭和45年2月7日生。平成6年3月京都大学大学院修士課程修了。現在関西電力(株)勤務。京都大学大学院在学中に超電導エネルギー貯蔵の電力系統応用に関する研究に従事。