



研究ノート

# 熱電変換による電力系統の安定化

松浦 虔士\*

## 1. パワージェネクトロニクス

パワーエレクトロニクスということが言われ出したのは昭和30年代の中頃であろう。米国でトランジスタの発明に次いで、電力用のサイリスタが登場してきた頃である。

パワーとエレクトロニクスを複合したこの新語に最初は何となく馴染めなかったが、今では人口に膾炙している。しかし筆者はこの用語を好まない。何故かという、エレクトロニクスにパワーが冠せられているにも拘らず、どう考えてみてもパワーが主役ではないからである。パワーエレクトロニクスにおけるパワーは、多くの場合、単に直流から交流に変換されたり、その量が調整されたりしているにすぎない。エレクトロニクスでパワーが好きなように料理されているというイメージである。そこに何か欠落していて物足りない。狭義の解釈かも知れないが、パワーの源をつくり出す部分を積極的に込めた用語ととり難いのである。

研究とは不思議なもので、このような用語に対する嫌悪感が新しい世界を拓ききっかけを与えてくれる。この小文のタイトルの研究は、まさにそのようなところに源を発したものである。

新しい“パワージェネクトロニクス”という世界への旅立ちがここからはじまる。そこでは、パワーの発生とその制御が主役である。

## 2. 熱⇄電変換の巧妙な使い分け

水力発電と僅かばかりの風力、太陽光発電を除けば、今日、石炭、石油、LNGをはじめ、ウラン核分裂による熱から大量の電気エネルギーを得ている。期待されて久しい核融合発電で

も熱から最終は電気へである。

これら熱から電気への大容量発電では、熱源と発電機の間にはタービンという回転機械が介して来る。電力系統につながる何百台という発電機の同期運転を安定に維持できる度合—これを電力系統の安定度と云っている—を如何にして高めるか。その問題は電力系統がある限り、永遠に存在する研究課題であるといわれている。

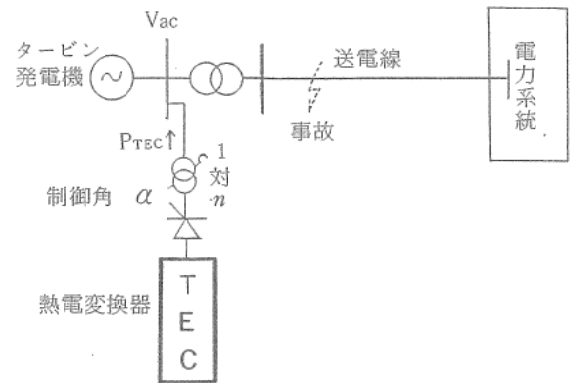


図1 電力系統と熱電変換器

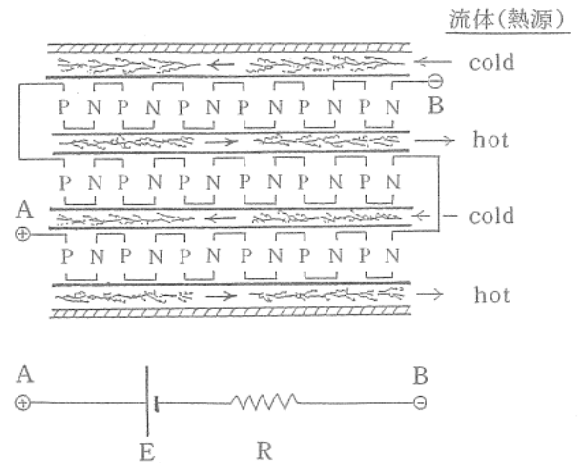


図2 熱電変換部

筆者は、一つの新しい試みとして、熱電直接変換を司る静止機器を回転機械であるタービン発電機と併用することによって、電力系統の安定度向上を計ることを考えた。図1は、この考

\*松浦虔士 (Kenji MATSUURA), 大阪大学工学部, 電気工学科, 助教授, 工学博士, 電力工学

えを説明するための簡単な系統図である。図中TECとあるのは、Thermoelectric converter（熱電変換器）のことで、実際には図2に示すように多数のp形・n形半導体素子に熱源の温度差を与えて熱起電力を生ぜしめている。従ってTECを簡単に等価的に表わすと、半導体素子そのものの電気抵抗に基づく内部抵抗Rと直流熱起電力Eの直列要素となる。これを制御角 $\alpha$ の電力変換器を介してタービン発電機の端子（交流電圧Vac）に接続したとき、TECの電気出力 $P_{TEC}$ はSI単位系で次のように計算される。

$$P_{TEC} \approx \left( \frac{3X_c}{\pi R^2} \right) E^2 - \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi R} \right) (nV_{ac} \cos \alpha) E - \left( \frac{18}{\pi^2 R} \right) (nV_{ac} \cos \alpha)^2$$

ここに、nと $X_c$ はそれぞれ、変換器用変圧器の巻数比と転流リアクタンスを表わす。 $R \gg X_c$ とした。

上式から明らかなように、 $P_{TEC}$ は、制御角 $\alpha$ のとり方によって、正にも負にもなる。電力系統の通常運転時は、TECは発電機であるから持てる能力一杯の出力を系統に供給する。この場合、 $\alpha = \cos \{-\pi E / (6\sqrt{2}nV_{ac})\}$ と選ばれ、 $P_{TEC} \approx E^2 / (4R) > 0$ である。熱→電変換モードでの最大出力運転といえる。

ところで、電力系統では、雷などによる事故の発生を前提としている。例えば、図1の送電線の部分で短絡とか地絡事故が生じたとしよう。この場所、1秒以内の迅速な“処置の仕方”によって、事故による影響が消滅するか、拡大するかの勝負が決まる。通常、事故継続中は、タービン発電機の前動機入力が発電機出力を上廻りタービンと発電機の回転子は加速される。リレーと遮断器の連携プレーで事故区間を切り離す動作が次に入るが、この動作が遅いと加速を抑えきれず発電機は不安定（脱調）に陥る。動作が間にあって減速方向に戻せても、一旦生じた動揺を元に戻す迄に時間がかかる。不安定の回避はもちろん重要であるが、電力系統は上記のような加減速の繰り返し動揺をも嫌うのである。

そこで、TECによる熱⇄電双方向変換の登

場となる。タービン発電機の加減速に応じて、制御角 $\alpha$ をコントロールする。この動作は迅速で、加速期間は $P_{TEC} < 0$ となるように、減速期間は $P_{TEC} > 0$ となるように調整すればよい。前者は電→熱変換であり（発電機回転子にブレーキ作用を与える）、後者は熱→電変換（発電機回転子に加速作用を与える）である。ところで先に示した $P_{TEC}$ の式で熱起電力Eを0とすると $\alpha$ を如何に調整しようとも常に $P_{TEC} < 0$ となることがわかりであろう。この場合、半導体素子は単に抵抗素子Rとして用いられているだけである。それだけの機能なら、半導体を持ち出すまでもなく、鋼帯とか水（水抵抗）で用を足せる。事実、そのようなもので加速動揺の抑制のみを狙った制動抵抗方式なるものが実現している<sup>1)</sup>。制動抵抗方式は、動揺第一波の抑制に効果を発揮するが、第二波以降の抑制能力は不十分である。TECは、 $P_{TEC} \geq 0$ のコントロールが可能であるから第二波以降の動揺抑制にも十分効果があり、電力系統で生じた動揺を極めて迅速に消滅させられると考えられる。次に、このことを計算機シミュレーションによって示してみよう。

### 3. 電力系統に対する安定化効果

計算機シミュレーションの対象とした電力系統を図3に示す。1300MVAの大容量発電機2機並列・500kV—200km並行2回線送電線で主系統にフルパワーの電力を供給している。この時2台のTECもそれぞれ100MWを発生しているが、送電端から1kmの地点で1回線3相短絡事故が発生し、事故継続時間0.1秒後に事故回線を切り離すという条件でシミュレーションを行った。

結果を図4に示す。期待どおり、第一動揺がおさまった後ほぼ安定となっている。これを制御角 $\alpha$ の動きと関連させて詳細に観察すると次のようなことがわかる。事故発生直後発電機出力 $P_g$ は大幅に低下し、 $\alpha$ が0となってTECの電力吸収（ $-P_{TEC}$ ）を増やそうとする（電→熱変換モード）。事故回線が0.1秒後に切り離されると $-P_{TEC}$ は急速に増加し、0.32秒で回転子角 $\delta$ （ $\Delta\delta$ はその変化分）は減少に向う。回転子角速

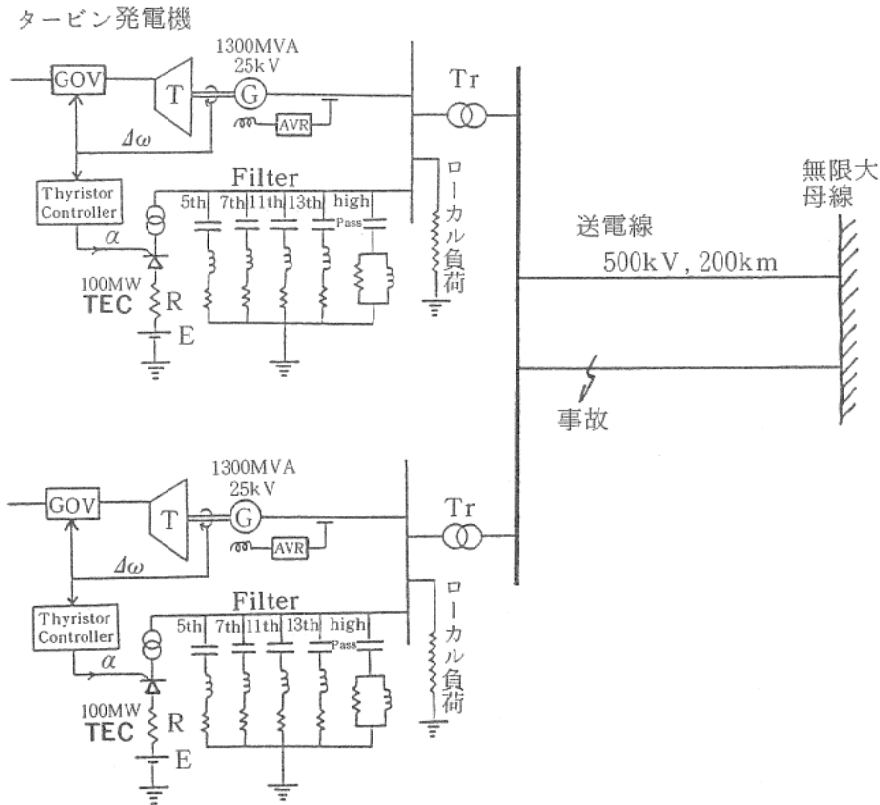


図3 シミュレーション用電力系統

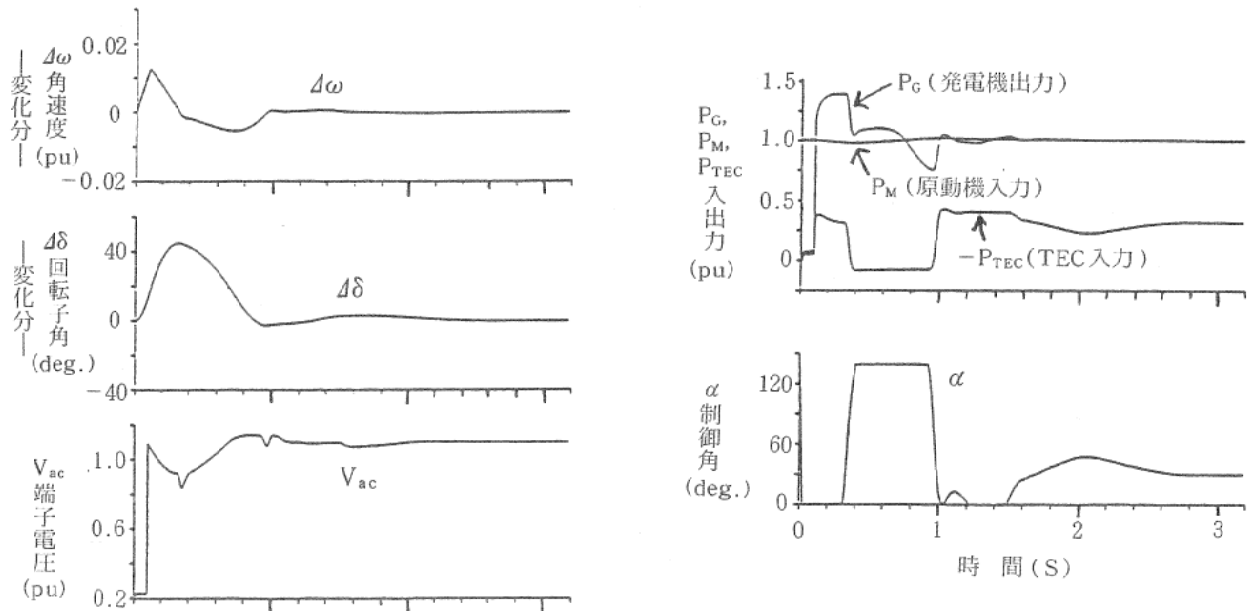


図4 過渡動揺のシミュレーション結果

度  $\omega$  の変化分  $\Delta\omega$  は負となり  $\alpha$  が増加する.  $\alpha$  が最大値に達すると  $P_{TEC}$  は正 ( $-P_{TEC}$  は負) となり TEC は発電モード (熱→電変換) に転じる. このモードでの運転は, 0.32秒から 1.0

秒までの大部分の期間を占めている. この期間に減速し過ぎを防止し, 系の安定化効果を高めている. 因みに, TEC を用いぬ場合, 同じ系統条件に対し系は第一波の加速動揺で脱調 (不

安定) となった。また、単なる制動抵抗方式では、動揺の幅が大きく、動揺のおさまりは劣っていた。結局、TECの熱起電力に基因する発電能力が安定化のために大きな効果を示したといえる。

#### 4. 今後の展望

電力系統へのソリッドステートパワージェネクトロニクスへの導入は、筆者の長年の夢である。この小文の着想は、幸い日米両国で受け入れられ<sup>2),3)</sup> ほぼ同時に発表された。しかし、まだまだ序の口であり、夢の実現には程遠い。幸い、アモルファスの熱電材料で素子性能、コスト共に期待の持てそうなものが現れはじめており<sup>4)</sup>、この秋(9月)には、ヨーロッパで第1回の国際熱電変換会議(ECT'87)が開かれる。長

年日の目を見なかったこの分野にも新しい波が押し寄せていることをひしひしと感じる。

今、新たな試みとして核融合炉用の熱電発電の構想を練っている。電力系統に動揺を与えることのない大出力のパルス磁場発生装置への応用などがとりあえず頭にある。今後の研究の展開が楽しみである。

#### 文 献

- 1) 大脇, 有働: 電学誌, 106巻, 646 (1986).
- 2) 松浦: 電学論B, 107巻, 307 (1987).
- 3) K.Matsuura: Power Systems Research Journal, Vol. 12, Issue 3, 227 (1987).
- 4) K.Matsubara, T.Koyanagi & T.Takagi: Proceedings of the Sixth International Conference on Thermoelectric Energy Conversion, Arlington Texas, 1 (1986).

