

超電導ケーブル導入による大都市電力システムの 過渡安定度向上効果

Transient Stabilizing Effect of Superconducting Cable Introduced in a Metropolitan Electric Power System

後藤泰之[†] 一柳勝宏[†] 石田達磨^{††}

Yasuyuki Goto, Katsuhiko Ichiyanagi, Tatsuma Ishida

Abstract A superconducting power transmission system is regarded as being a promising candidate to transmit a bulk electric power through a limited small space. The power system with superconducting power transmission system is operated with the sufficient stability margin and small transmission loss energy. In this paper, the transient stability of the power system to operate superconducting transmission is evaluated at some faults on conventional transmission line or superconducting cable. It is shown that the stability is improved at the both faults on conventional cables and superconducting system with the network changes.

1. まえがき

将来の大都市地域における高度情報化社会の進展や高機能機器の集中により、今後の電気エネルギーは量的には大容量・高密度、質的には高安定性・高信頼性という条件が必要となる。このような問題に対して、これまででは在来の送電線路を拡充することにより対処してきた。しかし、このような在来送電線路の拡充は都市近郊における電力用施設の立地が困難となっていることから、将来的に行きづまる傾向にある。このような、将来の電力需給問題を根本的に解決する手段として超電導ケーブルをはじめとする超電導機器の導入が検討されている⁽¹⁾。超電導ケーブルの送電容量は1回線当たり数百万kWに達すると考えられておりこれは、同一電圧階級の地中ケーブルよりも一桁大きく、架空送電線と同等かそれ以上である。また、リアクタンスは地中ケーブル並に低いと考えられる。このような電気的特性を持つ超電導ケーブルを電力システムに導入することにより、系統全体の送電損失の低下、電圧安定性の向上などの効果が得られる^{(2),(3)}。

一般に、多機系統における発電機の位相面表示はその数も多くなり一機無限大母線系のような位相面解析は困難となる。そこで、本報告では位相中心の考え方に基づく等価簡略法^{(4),(5)}を用いて超電導ケーブル導入による大都市電力システムの過渡安定度の向上効果について検討を行う。具体的には超電導ケーブルを導入した大都市電力システムのモデル系統を想定し、系統故障時における発電機の位相動揺により超電導ケーブル導入による過渡安定度向上効果を確認した。さら

に、超電導ケーブル故障時において電力供給力を維持するための系統切替操作について位相面解析を用いて検討を行った。また、系統切替時の角速度変化を二次曲線近似することにより最適切替時間を求める方法についても検討を行ったので報告する。

2. 位相中心による多機系統の等価簡略

多機系統の発電機位相表示や位相面表示の取扱いを可能にするために、本報告では位相中心の考え方に基づく等価簡略法^{(4),(5)}を用いて検討を行う。これは系統の発電機を動揺の大きな発電機群と動揺の小さな発電機群の二つに分割し、それぞれ位相中心に総慣性定数が集中した一台の発電機に置き換えて等価二機系統、さらに一機無限大母線系統に簡略化するものである。動揺の大きな発電機の集合をA、動揺の小さな発電機の集合をBとする。それぞれの発電機群の位相 δ_A 、 δ_B は式(1)、式(2)で表される。

$$\delta_A = \frac{1}{M_A} \sum_{k \in A} M_k \delta_k \quad (1)$$

$$\delta_B = \frac{1}{M_B} \sum_{k \in B} M_k \delta_k \quad (2)$$

ただし、 M_A 、 M_B は各発電機群の総慣性定数であり、以下のように表される。

$$M_A = \sum_{k \in A} M_k \quad (3)$$

$$M_B = \sum_{k \in B} M_k \quad (4)$$

一機無限大母線系統に等価簡略後の発電機位相 ψ は δ_A 、 δ_B を用いて式(5)のように表される。

$$\psi = \delta_A - \delta_B \quad (5)$$

[†] 愛知工業大学 電気工学科 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 大学院 電気電子工学専攻 (豊田市)

また, 等価簡略後の発電機角速度 $\dot{\psi}$ は以下のように表される.

$$\dot{\delta}_A = \frac{1}{M_A} \sum_{k \in A} M_k \dot{\delta}_k \quad (6)$$

$$\dot{\delta}_B = \frac{1}{M_B} \sum_{k \in B} M_k \dot{\delta}_k \quad (7)$$

$$\dot{\psi} = \dot{\delta}_A - \dot{\delta}_B \quad (8)$$

等価簡略後の発電機の位相角 ψ (以下, 等価発電機位相と記す), 角速度 $\dot{\psi}$ (以下, 等価発電機角速度と記す)を用いることにより多機系統であっても簡単にただ一つの発電機位相表示および位相面表示が可能になる.

3. モデル系統

大都市電力システムとして想定した超電導型モデル系統を図1に示す. 液体ヘリウム冷却の超電導ケーブルは送電電圧275kV, 送電容量5,000MW \times 2回線で大容量湾岸火力発電所G3,G4と都心部の母線とを直結するルートに導入されており, 都心部に一括して電力を供給している. 都心部に供給された電力のうち, 消費されなかった電力は既設の地中ケーブルによって都心部から都市周辺部に向かって供給される. 図中A,B,C,D点の4箇所の母線は変電所の分割母線となっており, このモデル系統では切り離されているため, それぞれ外輪線側と都心部側から受電している. また, これによりこのモデル系統は放射状系統を構成している.

比較の対象として, 超電導ケーブルを導入せず, 外輪線上の4箇所から回線数が増強された在来送電線により, 求心的に都市部へ電力供給を行う在来型モデルを想定した. 図2にその構成を示す. この系統ではA,B,C,D点の分割母線を接続し, 都心部の母線を切り離すことにより, 放射状系統を構成している. また, 発電機出力・負荷の地域分布などは超電導型モデルと同一としている.

4. 系統故障時における超電導ケーブルの導入効果

シミュレーションを行う上で, 故障条件として次のような2つのケースを設定した.

・ケース1: 外輪線の故障として図1, 図2のX点における1/2回線の永久地絡故障

・ケース2: 都心部の故障として図1, 図2のY点における1/2回線の永久地絡故障

上記の故障発生後, 数秒後に故障送電線を開放し故障除去した場合の発電機位相を調べた. 以後, 「故障発生」から「故障除去」までの時間を故障時間 t_{fault} と記して検討を行う.

外輪線において故障発生後0.050秒後に故障除去した場合($t_{fault}=0.050$ 秒)の各発電機位相動揺の様子

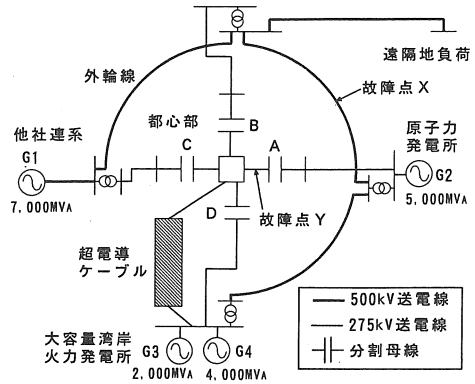


図1 超電導型モデル系統

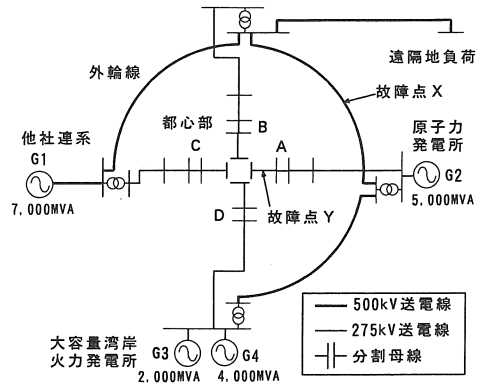
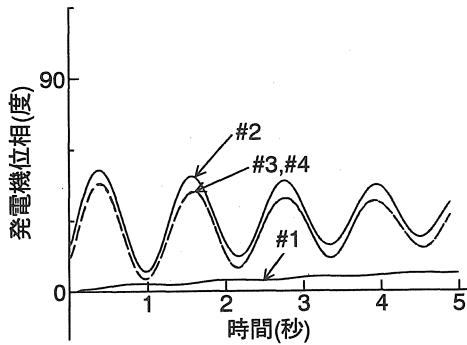


図2 在来型モデル系統

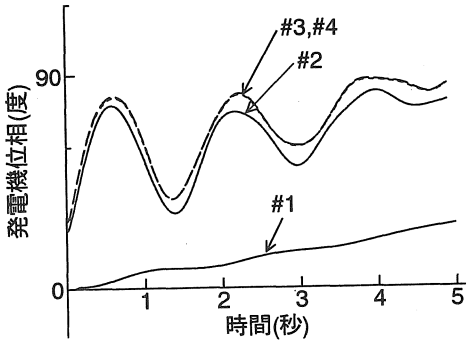
を図3に示す. 図3-(a)は超電導型モデル, 図3-(b)は在来型モデルの位相動揺を表す. 同図からそれぞれのモデル系統について動揺の大きな発電機G2, G3, G4と動揺の小さな発電機G1の2つの発電機群に分けることができる. そこで, 第2章で述べた位相中心の考え方をういた等価簡略を行い, それにより得られる系統の等価発電機位相 ψ , 等価発電機角速度 $\dot{\psi}$ を用いて以後の検討を行うものとする. 図4の実線は超電導型モデル, 破線は在来型モデルの等価発電機位相動揺を表している. それぞれの最大位相を比べると, 超電導型モデルでは46.4度, 在来型モデルでは77.4度となり超電導型モデルの方が小さな値となった.

表1に種々の故障時間における等価発電機最大位相の値を示す. 同表から, 在来型モデルにおいては故障時間 $t_{fault}=0.066$ 秒で不安定脱調現象を示すが, 超電導型モデルにおいては故障時間 $t_{fault}=0.166$ 秒まで動揺は大きいものの安定度は維持できていることが分かる.

同様に都心部における故障時間 $t_{fault}=0.050$ 秒の場合でのシミュレーション結果を図5に示す. それぞれの最大位相を比べると, 超電導型モデルでは38.4度, 在来型モデルでは46.1度となり超電導型モデルの方



(a) 超電導型モデル



(b) 在来型モデル

図3 外輪線(X点)故障時の各発電機位相 ($t_{fault}=0.050$ 秒)

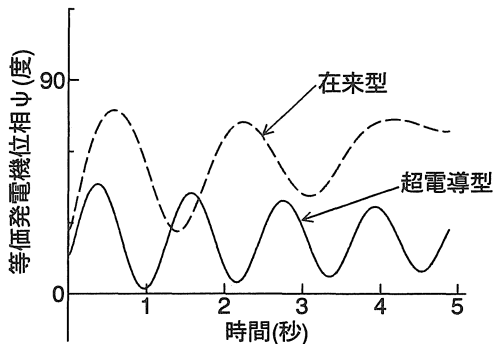


図4 外輪線(X点)故障時における等価発電機位相 ($t_{fault}=0.050$ 秒)

表1 外輪線故障時の等価発電機最大位相

故障時間(秒)	超電導型(度)	在来型(度)
0.050	46.4	77.4
0.066	56.5	×
0.083	67.7	×
0.100	80.8	×
0.116	98.4	×
0.133	×	×

×印は不安定脱調現象を示したものの

が若干小さな値となった。

他の故障時間における最大位相の値を表2に示す。同表から、どの故障時間においても超電導型モデルは在来型モデルに比べて最大位相は小さくなっていることが確認できる。

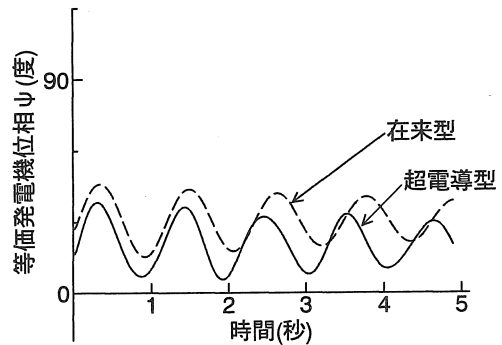


図5 都心部(Y点)故障時の等価発電機位相 ($t_{fault}=0.050$ 秒)

表2 都心部故障時の等価発電機最大位相

故障時間(秒)	超電導型(度)	在来型(度)
0.050	38.4	46.1
0.066	45.8	52.7
0.083	53.5	59.6
0.100	61.7	67.1
0.116	70.5	75.5
0.133	80.5	85.2
0.150	92.5	97.8
0.166	109.5	×
0.183	×	×

×印は不安定脱調現象を示したものの

5. 超電導ケーブル故障時の系統切換操作

5.1 系統切換操作手順

超電導ケーブルは、熱絶縁の必要性があり完全に外界から遮蔽されるため、送変電設備の主な事故原因である雷、風雨、氷雪、異物接触を排除することができ、高信頼性という特長を持っているといえる。しかし、超電導ケーブルに故障が発生する可能性は低いとしてもその両端における母線事故などを含めて、超電導ケーブルが系統から脱落することを考える必要がある。このような場合、超電導ケーブルの送電電力は非常に大きいため、供給支障が広範囲に及ぶ危険性がある。したがって、超電導型モデルにおいて超電導ケーブルに故障発生した場合の系統切換操作について検討しておく必要がある。

超電導型モデルでは、都心部への一括した電力供給を行っている。しかし、このような系統構成では超電導ケーブル故障時に都心部への電力供給はできない。そこで超電導ケーブル故障時には図6に示すように、ある放射状系統からループ状系統を経由して別の放射状系統へ移行する系統切換操作⁶⁾を用いて、求心的に都心部への電力供給を行う系統構成へ切り換えるものとする。

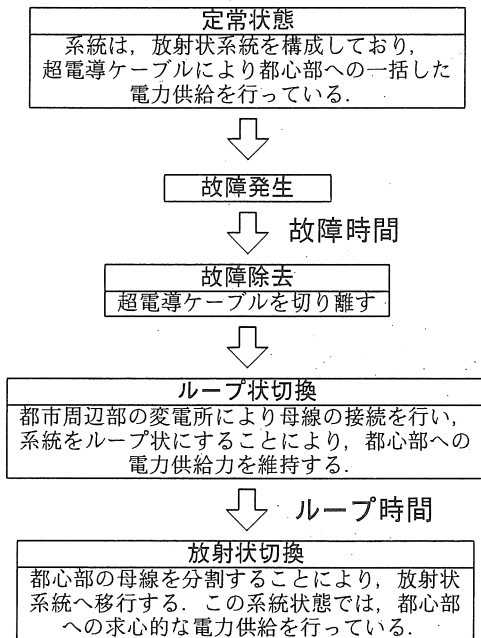


図6 超電導ケーブル故障時の系統切換操作

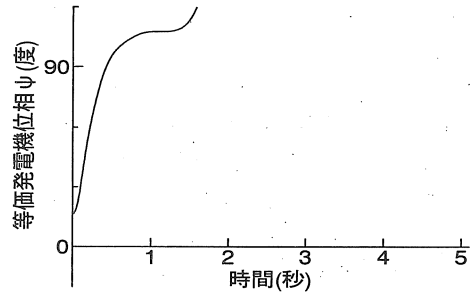
以後、図6中の「故障発生」から「故障除去」までの時間を故障時間 t_{fault} 、「ループ状切換」から「放射状切換」までの時間をループ時間 t_{loop} として記す。

このような、系統切換操作について第2章で述べた等価発電機位相 ψ 、等価発電機角速度 $\dot{\psi}$ を用いた ψ - $\dot{\psi}$ 位相面解析により検討を行う。

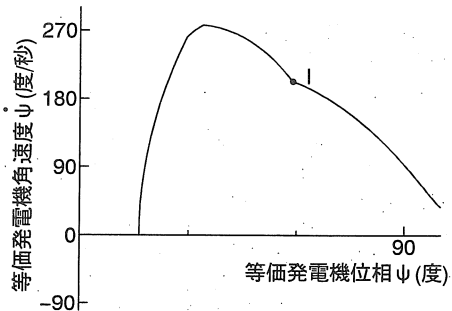
5.2 安定度向上のための系統切り換え操作による検証

一例として、超電導ケーブルに故障発生後0.100秒の時点で超電導ケーブルを切り離し ($t_{fault}=0.100$ 秒)、その後0.016秒で都市周辺部の分割母線 (図1のA, B, C, D)を接続し、系統をループ状に切り換える。その後、0.100秒の時点で都心部の母線を分割し放射状系統に戻した場合 (ループ時間 $t_{loop}=0.100$ 秒) の等価発電機位相を図7-(a)に、等価位相面軌跡を図7-(b)に示す。図7-(b)中のI点は放射状系統への切換点を表す。同図から、このような系統切換の場合では不安定脱調現象を示すのが分かる。

次に、図7-(b)のI点よりも0.150秒遅れて放射状切換を行った場合のシミュレーション結果 ($t_{loop}=0.250$ 秒) を図8に示す。同様に図8-(a)は等価発電機位相、図8-(b)は等価位相面軌跡である。また、図8-(b)のII点は放射状切換点を表す。この場合では、最大位相は73.2度と大きくなってはいるが、安定度は維持できている。

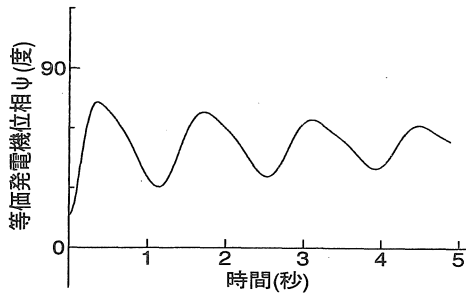


(a) 等価発電機位相

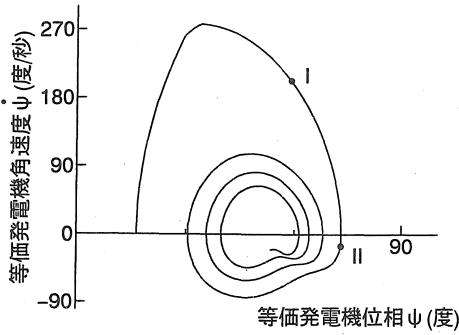


(b) 等価位相面軌跡

図7 超電導ケーブル故障時の等価発電機位相 ($t_{fault}=0.100$ 秒, $t_{loop}=0.100$ 秒)



(a) 等価発電機位相



(b) 等価位相面軌跡

図 8 超電導ケーブル故障時の等価発電機位相 ($t_{fault}=0.100$ 秒, $t_{loop}=0.250$ 秒)

表3は故障時間 $t_{fault}=0.100$ 秒の場合におけるループ時間 t_{loop} と最大位相の関係を示したものである。同表より、故障時間 $t_{fault}=0.100$ 秒の場合の最適ループ時間は 0.250 秒～ 0.300 秒程度であるといえる。

表 3 超電導ケーブル故障時の等価発電機最大位相 ($t_{fault}=0.100$ 秒の場合)

ループ時間 (秒)	最大位相 (度)
0.05	×
0.10	×
0.15	86.2
0.20	76.3
0.25	73.2
0.30	73.2
0.35	80.3
0.40	90.0
0.45	×

×印は不安定脱調現象を示したもの

5.3 最適ループ時間の推定

第5.2節では故障時間 $t_{fault}=0.100$ 秒の最適ループ時間を様々な条件におけるシミュレーション結果から試行錯誤を繰り返して行うことにより求めた。同様の方法を用いて求めた故障時間 $t_{fault}=0.050$ 秒の場合の最適ループ時間を表4に繰り返し計算による算定値として示す。しかし、このような方法はあまり実用的でなく故障除去時点における系統状態から最適ループ時間を求める必要がある。そこで、ループ切替直後からの時間 t と等価発電機角速度 $\dot{\psi}$ の関係を二次曲線 $\dot{\psi} = at^2 + bt + c$ で近似し、得られる近似曲線より $\dot{\psi}=0$ となる時間 t を求める。第5.2節の結果から最適ループ時間による切替は $\dot{\psi}=0$ の時点から1～2サイクル程度経過した時点で行われていることが分かる。そこで、 $\dot{\psi}=0$ となる時間 t から1サイクル (0.016 秒) ほど後の時間を最適ループ時間の推定値とする。

二次曲線近似による最適ループ時間の推定値を表4に二次曲線近似による推定値として示す。第5.2節で検討した故障時間 $t_{fault}=0.100$ 秒の場合の最適ループ時間を二次曲線近似を用いて推定した結果、最適なループ時間 t_{loop} は 0.216 秒となり、その場合の最大位相は 74.3 度となった。第5.2節で繰り返し計算により経験的に求めた値ではループ時間 $t_{loop}=0.250$ 秒で最大位相 73.2 度であったのでほぼ正確に推定できているといえる。また、故障時間 $t_{fault}=0.050$ 秒の場合では二次曲線近似により推定した最適ループ時間は 0.233 秒で、最大位相 50.5 度となった。繰り返し計算により経験的に求めた値は 0.250 秒で、 49.6 度であったのでこの場合でも正確に推定できている。

表 4 二次曲線近似による最適ループ時間の推定結果

故障時間 (秒)		二次曲線近似による推定値	繰り返し計算による算定値
0.05	最適ループ時間	0.233 秒	0.250 秒
	最大位相	50.5 度	49.6 度
0.10	最適ループ時間	0.216 秒	0.250 秒
	最大位相	74.3 度	73.2 度

6. まとめ

超電導ケーブルを導入した将来の大都市電力システムを想定し, 都心部および外輪線における在来送電線故障時のシミュレーションを行った. その結果, 超電導ケーブル導入時には過渡時の等価発電機位相が小さくなる等の過渡安定度向上効果が確認できた. また, 超電導ケーブル故障時における電力供給力維持のための系統切換操作についての検討を行った. その結果, 系統等価簡略後の発電機位相・角速度を用いた等価位相面軌跡による系統切換の妥当性, また二次曲線近似を用いた最適ループ時間推定の妥当性について確認できた. 今後, 系統シミュレータを用いた実験的検証を行う予定である.

なお, 本研究は中部電力株式会社の平成8年度受託研究として行ったものである.

参考文献

- 1) 塚本他:「超電導電気機器研究開発の現状と展望

—実用化に近づきつつある夢の技術—」,
電学論B,116[7] pp.762-769 (1996)

- 2) 加藤他:「超伝導ケーブルが導入された大都市送電系統全体の送電損失の評価」,
電学論B,114[12] pp.1303-1309 (1994)
- 3) 加藤他:「大容量超伝導ケーブルが導入された大都市電力系統の電圧安定性評価」,
平成7年 電力技術研究会,PE-95-110 (1995)
- 4) A.Rahimi他:”Dynamic Aggregation and the Calculation of Transient Stability Indices”,
IEEE Trans. Vol.PAS-91, No.1, pp.118-122 (1972)
- 5) Y.Xue他:”A Simple Direct Method for Fast Transient Stability Assessment of Large Power Systems”,
IEEE Trans. Vol.3, No.2, pp.400-412 (1988)
- 6) 早川他:「極低温大容量送電線の事故脱落時における大都市送電系統の電力動揺解析」,
電学論B,110[10] pp.834-840 (1990)

(受理 平成9年3月21日)