超電導限流器の短絡電流計算への組み込みと設置点に関する検討

正員 永田 真幸 (電力中央研究所)

正員 田中 和幸 (電力中央研究所)

Short Circuit Current Calculation Method and FCL Location Selection Method
of Large-Scale Power System incorporating Superconducting Fault Current Limiters

Nagata Masaki, Member, Tanaka Kazuyuki, Member (CRIEPI)

Maximum short circuit current of modern power system is becoming so large that circuit breakers are not expected to be able to shut down the current in near future. Fault Current Limiter (FCL) is supposed to be an effective solution of this problem and recent progress of superconductivity technology and power electronics makes it possible to develop current limiting type FCL such as diode-bridge type FCL. Current limiting type FCL limits the current through the FCL and its equivalent impedance is not constant and depends on fault location, operating point of power system and the limit of the current through FCL. In this paper, a method to incorporate such FCL into short circuit current analysis is proposed. Also, an efficient method to find location of FCLs suitable to suppress short circuit currents of more than one fault locations is developed. The efficiency and effectiveness of these methods are shown by numerical examples.

キーワード : 短絡電流計算, 限流器

1. はじめに

電力系統では、近年の需要増に対応するために大規模化、連系強化が行われてきている。これらの方策は系統の供給力向上には効果的である反面、系統事故時に短絡電流を大きく増大させる原因ともなっている。その結果、今後、短絡電流が現状の遮断器定格遮断電流を上回る可能性があることが指摘されており、何らかの対策を講じる必要がある。その一つとして限流器の導入による短絡電流の抑制が検討されている。

近年の超電導技術の進展を背景として、これを利用した超電導限流器の開発が進められている。基幹系統への超電導限流器の導入を考える場合、第一にその短絡電流抑制効果を評価する必要がある。そのための手法として短絡電流計算が挙げられるが、これはいわゆる故障計算の一種であり、対称座標法をベースとした解析手法が従来より主流となっている⁽¹⁾。そのため、(1) 電流波形は正弦波である、(2) 遮断器が動作する事故発生後2,3波目以降の時間領域を解析の対象とする、の2点を仮定した計算となる。超電導限流器に関して、これまでの検討で事故発生後2,3波目以降では、限流動作が完了していることが明らかにされており⁽²⁾、この時間領域での短絡電流計算による解析が妥当であると考えられる。

超電導限流器には様々な種類があるが⁽³⁾、短絡電流計算

の適用を考えると以下の2種類に大別することができる。
定インピーダンス型 動作時に設置点に固定のインピーダンスを発生させるタイプ

電流制限型 動作時に限流器の通過電流を一定値で制限するタイプ

この2種の超電導限流器の動作パラメータ⁽⁴⁾のうち、短絡電流計算において重要となるパラメータは、定インピーダンス型については、限流動作完了時に出現するインピーダンスであり、電流制限型については、動作時の通過電流の上限値(制限電流)である。

制限電流が指定される電流制限型限流器は、系統条件によって等価インピーダンスが変化するのに対し、従来の短絡電流計算ではインピーダンスが固定されたネットワークを解析の対象としており、このような限流器を扱うことはできなかった。

また、限流器の実用化を系統の計画画面から見た場合、系統のどこに限流器を設置すれば短絡電流を効果的に抑制できるか、の検討が不可欠となる。単一の事故点でのみ、短絡電流の抑制が必要な場合には簡単に解を得ることができるが、複数の事故点での短絡電流の抑制が求められる場合には、短絡電流計算レベルで適切な設置点を選定する手法が必要になる。

このような短絡電流の低減と系統の静的な安定性(電圧安定性)について系統構成面から検討を行った例として

文献⁽⁵⁾があるが、本文献では常時の系統インピーダンス変更による短絡電流低減が考慮されているのに対し、超電導限流器は「常時のインピーダンスは(ほぼ)0であり、事故発生と同時に(速やかに)限流に必要なインピーダンスを発生し、事故除去後は速やかに常時状態に復帰する」という特性の実現を目指して開発が進められており、このような動作特性を考慮した検討が必要と思われる。また、電流制限型のような系統条件によって等価インピーダンスが変化するタイプの限流器の扱い方も与えられていない。

以上のことから、本稿では以下の計算を効率よく行う手法について述べる。

- 電流制限型限流器に対応した短絡電流計算
- 超電導限流器の動作特性を考慮した、特に複数の事故点に関して短絡電流の抑制が必要な場合の限流器の設置点の算出

2. 電流制限型限流器の短絡電流計算への組み込み

〈2・1〉 電流制限型限流器等価インピーダンスの計算法
短絡電流計算で、電流制限型限流器の動作を模擬するには、限流器の通過電流を制限電流と等しくするような限流器の等価インピーダンスを設置点に挿入すればよい。この等価インピーダンスが得られれば、従来の短絡電流計算手法を用いて、電流制限型限流器がある場合の短絡電流計算を行なうことができる。

限流器の設置点として、系統内のブランチおよびノードの母線連絡線(以下、母連と呼ぶ)の2通りを考慮する。また、式展開の簡単化のため、想定事故として3相短絡(3LS)のみを考慮する。事故として非対称故障を想定した場合、一相または二相の限流器のみが動作し、線路定数が不平衡となるため計算が複雑となるが、この場合でも対称座標法を用いて計算が可能であることが示されており⁽⁶⁾、本稿に述べる手法は非対称故障にも応用が可能であると考えられる。

〈2・1・1〉 ブランチ設置の場合 3LS事故を仮定した場合の短絡電流計算では系統の正相回路のインピーダンスが必要となる。系統の健全時、限流器がない場合の3LS事故時、限流器が動作した場合の3LS事故時の正相回路をそれぞれ、図1(a)、(b)、(c)で表す。限流器動作を模擬するには、図1(c)の回路において $k-l$ 間の電流の大きさが限流器制限電流 I_L と等しくなるように、限流器等価インピーダンス ΔZ を求めればよい。

図1(c)の回路は図1(d)と(e)の回路を重ね合わせたものである。なぜならば、図1(d)の回路は図1(b)の回路と等価であり、 $k-l$ 間の電流は、限流器がない場合の事故時の $k-l$ 間の電流 I_N と等しくなるからである。つまり、 ΔZ は図1(e)の回路の $k-l$ 間の電流が $I_L - I_N$ となるように決めればよい。

図1(e)で k, l から左側の等価インピーダンス Z_{Rkl} は、図1(b)のそれと同じであるので、図1(b)の回路

での $k-l$ 間のインピーダンスを Z_{Ekl} とすると、

$$Z_{Rkl} = \frac{Z_{(s)} Z_{Ekl}}{Z_{(s)} - Z_{Ekl}} \dots\dots\dots (1)$$

$$Z_{Ekl} = Z_{kk}^{(b)} + Z_{ll}^{(b)} - 2Z_{kl}^{(b)} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ただし、 $Z_{(s)}$ は限流器設置ブランチ s のインピーダンス、 $Z_{kl}^{(b)}$ は図1(b)の回路のインピーダンス行列の (k, l) 要素である。図1(e)で $k-l$ 間の電流は

$$\Delta I = -\frac{I_N \Delta Z}{Z_{Rkl} + Z_{(s)} + \Delta Z} \dots\dots\dots (3)$$

となるので、以上から、

$$\begin{aligned} I_L &= I_N + \Delta I \\ &= \left(1 - \frac{\Delta Z}{Z_{Rkl} + Z_{(s)} + \Delta Z}\right) I_N \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

となる。限流比($= I_L / I_N$)を α とおくと、(4)式右辺の()内が α と等しければよいので、

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \frac{1 - \alpha}{\alpha} (Z_{Rkl} + Z_{(s)}) \\ &= \frac{(1 - \alpha) Z_{(s)}^2}{\alpha (Z_{(s)} - Z_{kk}^{(b)} - Z_{ll}^{(b)} + 2Z_{kl}^{(b)})} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

となる。

ここで、図1(b)の回路は図1(a)の回路でノード i を接地した回路であるので、 $Z_{ki}^{(a)}$ を図1(a)の回路のインピーダンス行列の (k, i) 要素として、

$$Z_{kl}^{(b)} = Z_{kl}^{(a)} - \frac{Z_{ki}^{(a)} Z_{lj}^{(a)}}{Z_{ii}^{(a)}} \dots\dots\dots (6)$$

となる⁽⁷⁾。

したがって ΔZ は

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \frac{(1 - \alpha) Z_{(s)}^2}{\alpha (Z_{(s)} - Z_{kk}^{(a)} - Z_{ll}^{(a)} + 2Z_{kl}^{(a)} + Z_d)} \dots\dots\dots (7) \\ Z_d &= \frac{(Z_{ki}^{(a)} - Z_{li}^{(a)})^2}{Z_{ii}^{(a)}} \end{aligned}$$

となる。(7)式により、限流器設置点の非設置時の電流 I_N 、健全時のネットワークのインピーダンス $Z_{ij}^{(a)}$ および限流器制限電流 I_L より、限流器の等価インピーダンスを求めることができることがわかる。前2つは限流器のない場合の短絡電流計算を行うことで得ることができるので、限流器のない場合の短絡電流計算を行えば、ごく簡単な計算で等価インピーダンスを算出できる。

さて、(5)式は I_F を非設置時の短絡電流として、以下のように変形できる。

図1 正相回路

Fig. 1. Positive Sequence Circuits

$$\begin{aligned}
 I_L &= I_N + \frac{Z_{kk}^{(b)} + Z_{ll}^{(b)} - 2Z_{kl}^{(b)} - Z_{(s)}}{Z_{(s)}^2} I_L \Delta Z \\
 &= \frac{Z_{ik}^{(a)} - Z_{il}^{(a)}}{Z_{(s)}} I_F + \frac{Z_{kk}^{(b)} + Z_{ll}^{(b)} - 2Z_{kl}^{(b)} - Z_{(s)}}{Z_{(s)}^2} V_L \\
 &= A_{is} I_F + B_{ss} V_L \quad \dots \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

すなわち、限流器動作時の設置ブランチの電流は、限流器なしの場合の電流に、事故点を接地した回路（図1 (b)）で設置ブランチに $V_L (= I_L \Delta Z)$ の電圧源を置いた場合の設置点の電流⁽⁷⁾を加えたものとなる。前者の計算では健全時の回路（図1 (a)）のインピーダンスを用い、後者の計算には事故点を接地した回路（図1 (b)）のインピーダンスを用いることに注意されたい。

系統内の複数の電流制限型限流器が動作する場合、ブランチ s をノード $k-l$ 間、ブランチ t をノード $m-n$ 間、 $Z_{(s)}$ 、 $Z_{(t)}$ をそれぞれ、ブランチ s 、 t のインピーダンスとして、(8) 式および文献⁽⁷⁾より、ブランチ s について、

$$I_{Ls} = A_{is} I_F + \sum_t B_{st} V_{Lt} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$t \in$ 限流器設置ブランチ

$$A_{is} = \frac{Z_{ik}^{(a)} - Z_{il}^{(a)}}{Z_{(s)}}$$

$$B_{st} = \frac{Z_{km}^{(b)} - Z_{kn}^{(b)} - Z_{lm}^{(b)} + Z_{ln}^{(b)}}{Z_{(s)} Z_{(t)}} - \frac{\delta_{st}}{Z_{(s)}}$$

となる。したがって、(9) 式を連立方程式として V_{Ls} について解けば、 $\Delta Z_{(s)} = V_{Ls} / I_{Ls}$ として、複数の電流制限型限流器が動作する場合での個々の限流器の等価インピーダンスを計算することができる。

〈2・1・2〉母連に設置した場合 電流制限型限流器を母連に設置する場合、母連をごく小さなインピーダンスを持つブランチとして扱えば、前節に述べた定式化を適用することで近似的に計算できる。しかしながら、母線構成が変化する毎に Y 行列に関する計算が必要となり、効率的な計算法とはいえない。以下に限流器を母連に設

置した場合の効率的な計算法を述べる。

筆者らは既に、ブランチの投入、ノードの分割を行った際にZ行列要素の修正分を効率的に求める手法を開発している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。母連に設置された限流器の等価インピーダンスは、これらの手法を応用することで効率的に計算することができる。すなわち、いったん母連を境としてノードを分割し、分割の結果得られる2つのノード間に、ブランチ電流が限流器制限電流と等しくなるようなインピーダンスを持つブランチを投入する、として計算すればよい。

3LS 事故時のノード分割前、ノード分割後、限流器動作時の正相回路をそれぞれ図1(f),(g),(h)で表す。限流器動作を模擬するためには、図1(h)の回路においてp-q間の電流の大きさが限流器制限電流 I_L と等しくなるように、限流器等価インピーダンス ΔZ を求めればよい。

ここで、図1(g)の回路と図1(h)の回路の差分をとると、図1(i)の回路となる。 ΔZ は、この回路のp-q間の電流が I_L となるように決めればよいことになる。

図1(i)において、

$$V_N = -I_L(Z_{pp} + Z_{qq} - 2Z_{pq} + \Delta Z) \quad \dots\dots (10)$$

となるので、これと文献(5)より、

$$\begin{aligned} \Delta Z &= -\frac{V_N}{I_L} - Z_{pp}^{(g)} - Z_{qq}^{(g)} + 2Z_{pq}^{(g)} \\ &= -\frac{I_N}{I_L F_{pq}} - Z_{pp}^{(g)} - Z_{qq}^{(g)} + 2Z_{pq}^{(g)} \quad \dots\dots (11) \end{aligned}$$

となる。 $Z_{kl}^{(g)}$ は図1(g)の回路のインピーダンス行列の(k,l)要素であり、文献(5)より、

$$Z_{ij}^{(g)} = Z_{ij}^{(a)} - \frac{E_{ipq} E_{jq}}{F_{pq}} \quad \dots\dots (12)$$

として得ることができる。 I_N は、限流器の無い場合に事故時に母連を流れる電流、 F_{pq} 、 E_{ipq} はそれぞれ、図1(j)の回路でp-q間を流れる電流、ノードiの電圧である。

(12)式の右辺の変数は全て、図1(j)の回路での単位電圧源の電位計算を一回行うことで得ることができる。すなわち、この単位電圧源の電位計算を一回行うだけで、 ΔZ の値を得ることができ、ブランチに設置した場合と同様に、限流器等価インピーダンスを効率よく求めることができる。

系統に電流制限型限流器が設置された場合の3LS事故時の短絡電流および電流分布を求めるための処理の流れ図を図2に示す。影のついていない部分が電流制限型限流器のための処理である。

〈2・2〉 数値例

モデル系統として、図3に示すNew England 系統を用いる。この系統で短絡電流が最大となる事故点ノードは16であり、無負荷時の短絡電流は28.052[pu]となる。

ここで、限流器の設置パターンとして

図2 電流制限型限流器を考慮した短絡電流計算の流れ図

Fig. 2. Flow Chart of Short Circuit Current Calculation Incorporating Diode-Bridge Type FCL

Case 1 ブランチ A に設置

Case 2 ブランチ B に設置

図3 New England 系統

Fig. 3. New England Power System

Case 3 AとBの両方に設置

の3通りを考える。

〈2・1〉節に述べた方法で計算した、各Caseでの短絡電流、AおよびBの電流、限流器等価インピーダンスを表1に示す。ただし、限流器は等価インピーダンスとしてリアクタンス分のみを持つものとし、限流器の制限電流は、簡単のため、いずれのケースでも非設置時の設置点の電流から2.0[pu]引いた値とした。

表1より、〈2・1〉節に述べた方法で限流器動作時の電流分布が正しく得られていることがわかる。AとBの片側にしか限流器を設置しない場合（Case 1 および Case 2）では、限流された電流の一部が限流器のないブランチから回り込むため、限流器設置ブランチでの電流の減少に比べ、短絡電流の減少値が小さくなっている。また、電流回り込みのため、限流器非設置ブランチでは短絡時の電流がかえって増加している。これに対し、Case 3では電流の回り込みが発生しないため、限流器設置ブランチでの電流減少値の和4.0[pu]と同じだけ短絡電流が減少している。

3. 限流器の設置点選定法

〈3・1〉設置点選定の考え方 本節では、特に複数の事故点に関して、短絡電流の抑制が必要な場合に、どこにどれだけの等価インピーダンスを持つ限流器を設置すればよいかの算出法について述べる。電流制限型限流器の制限電流は〈2・1〉節に述べた方法を応用して、等価インピーダンスから算出することができるので、ここでは限流器の等価インピーダンスのみを考慮し、制限電流は考慮しない。また、限流器の等価インピーダンスは正の値のみを取る（抵抗またはリアクタンス）とする。

限流器として超電導限流器を考えた場合、事故時のみ限流インピーダンスを発生することが期待できることから、文献⁽⁹⁾で考慮されている電圧安定性への影響は十分小さいと考えられる。そのため、設置点選定に当たっては、短絡電流の低減のみを考慮した。

超電導限流器は導入コストの観点から、設置点数（台数）をなるべく小さくすることが求められると考えられる。また、製造コストや製造技術、過電圧の抑制などの観点から、限流器等価インピーダンスには制約（上限）が設けられ、さらに必要な限流性能を確保した上で、等価インピーダンスをなるべく小さくすることが求められると考えられる。

以上の議論から、主として導入コストを考慮した場合、限流器の設置点および必要となる等価インピーダンスを求めるには以下の最適化問題を解けばよいと考えられる。

目的関数 限流器の設置点（設置台数）を最小化し、その上で限流器の等価インピーダンスの総和を最小にする

制約条件 限流器等価インピーダンスの上限内で、全ての事故点で短絡電流をある決められた値以下とする
ここで、限流器の設置点（設置台数）をなるべく少な

くすることに着目すれば、“短絡電流の低減に最も効果的な設置点”から1箇所ずつ設置点を選定していくという方法で十分最適解に近い解が得られると考えられる。以下では、この考えにしたがった限流器の設置点選定手法について述べる。

〈3・2〉短絡電流の低減に最も効果的な設置点の選定法 “短絡電流の低減に最も効果的な設置点”を言い替えると以下ようになる。

- 全て、ないし最も多くの事故点に対して、限流器を設置することで短絡電流を決められた値以下に抑える事ができる点
- 上記に該当する設置点が複数ある場合には、その中で限流器の必要等価インピーダンスが最も小さな値となる点

ここで、ある設置点（ノード $k-l$ 間のブランチとする）を仮定した場合に、ノード i での短絡電流 I_F を決められた値 I_L にするために必要な限流器の等価インピーダンス ΔZ は以下のように求めることができる。

まず、 $k-l$ 間のブランチに ΔZ のインピーダンスを直列に付加することと、同じブランチに Z_p のインピーダンスを並列に付加することが等価であるとする、当該ブランチのインピーダンスを $Z_{(s)}$ として、

$$Z_p = -\frac{Z_{(s)}(Z_{(s)} + \Delta Z)}{\Delta Z} \dots\dots\dots (13)$$

であり、このときノード i の駆動点インピーダンス Z_{ii} の変化量は

$$\begin{aligned} \Delta Z_{ii} &= -\frac{(Z_{ik} - Z_{il})^2}{Z_{kk} + Z_{ll} - 2Z_{kl} + Z_p} \\ &= -\frac{C_2}{C_1 + Z_p} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

となる⁽⁷⁾。ただし Z_{ij} はインピーダンス行列の (i, j) 要素である。事故として3相短絡を仮定すると短絡電流の変化量 ΔI_F は、 V_i をノード i の健全時の電圧として、

$$\begin{aligned} \Delta I_F &= \frac{V_i}{Z_{ii} + \Delta Z_{ii}} - \frac{V_i}{Z_{ii}} \\ &= \frac{V_i}{Z_{ii}} \frac{C_2}{C_1 + Z_p} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

となる。 $\Delta I_F = I_N - I_F$ となればよいので、

$$Z_p = \frac{I_L}{I_L - I_F} \frac{C_2}{Z_{ii}} - C_1 \dots\dots\dots (16)$$

となり、これを

$$\Delta Z = \frac{Z_{(s)}^2}{Z_{(s)} + Z_p} \dots\dots\dots (17)$$

に代入すれば、必要となる等価インピーダンスが得られる。ここでは限流器をブランチに設置する場合を仮定したが、母連に設置する場合も同様に計算できる。

表 1 限流器設置パターンによる比較
Table 1. Comparison between FCL configurations

限流器 設置パターン	短絡電流	ブランチ電流		限流器等価リアクタンス	
		A	B	A	B
非設置	28.052	9.470	5.887	—	—
Case 1	27.006 (−1.046)	7.470 (−2.000)	6.841 (+0.934)	j0.01478	—
Case 2	27.241 (−0.811)	10.659 (+1.189)	3.887 (−2.000)	—	j0.03542
Case 3	24.052 (−4.000)	7.470 (−2.000)	3.887 (−2.000)	j0.03291	j0.07304

() 内は非設置の場合の値からの増減値

図 4 限流器等価インピーダンスに上限がある場合の逸脱量

Fig. 4. Deviation of Fault Current from Limitation

さて、上記の手法で必要となる限流器等価インピーダンスを計算すると、その値が負となる場合がある。これは設置点に、どんなに大きな正の等価インピーダンスを持つ限流器を設置しても、すなわち事故中に設置点ブランチを開放するとしても、短絡電流を決められた値まで抑えることができない場合である。

以上に述べた方法で、考えられる限流器の設置点について必要となる等価インピーダンスを算出することで、値の正負、大きさから、どの設置点がネットワークの特性上、最適な設置点であるかを判断することができる。等価インピーダンスが正となる事故点が多いほど、正の等価インピーダンスの大きさが小さいほどよい設置点となる。

〈3・3〉 限流器等価インピーダンスに上限がある場合の設置点選定 限流器等価インピーダンスに上限のある場合には、事故点と限流器設置点の組合せにより、事故電流を要求される短絡電流値まで限流できない場合が生じる。このような場合を扱うために、限流しきれない電流値 (図 4 の逸脱量) を評価し、これを“最も効果的な設置点”の選定基準として用いることとした。

限流器等価インピーダンスに上限がある場合の最も効果的な設置点の選定アルゴリズムを図 5 に示す。

ここで、ある事故点 i と限流器設置点 (ブランチ $k-l$ とする) の組合せを考えた場合に、逸脱量 I_{ERR} は、 I_F を要求される短絡電流値、 Z_{max} を限流器等価インピーダンス上限値、 $Z_{(s)}$ を限流器設置点ブランチ s のインピーダンスとして、(13)、(14) 式で $\Delta Z = Z_{max}$ とすることにより、

$$I_{ERR} = \frac{V_i}{Z_{ii} + \Delta Z_{ii}} - I_F$$

$$= \frac{(C_1 + Z_p)V_i}{(C_1 + Z_p)Z_{ii} - C_2} - I_F \dots\dots\dots (18)$$

$$Z_p = -\frac{Z_{(s)}(Z_{(s)} + Z_{max})}{Z_{max}}$$

となる。

図 5 に示すように、提案手法は短絡電流の抑制が必要な事故点と限流器設置点の候補の組合せの全てについて、必要となる等価インピーダンスと逸脱量を評価することになる。ただし、〈3・2〉節および本節に示したように、必

図 5 最も効果的な設置点の選定アルゴリズム

Fig. 5. Flow Chart of Location Selection of FCL with Limitation of Equivalent Impedance

表2 限流器の設置・非設置による
短絡電流の変化

Table 2. Fault Currents with/without FCL

事故点 ノード	短絡電流 [pu]	
	非設置時	設置時
16	28.052	25.000
17	27.641	24.532
3	26.754	24.474
2	26.277	24.426
18	25.942	23.423
15	25.829	22.935
24	25.766	22.655
4	25.571	23.553
14	25.350	23.231

要となる等価インピーダンスの算出および逸脱量の計算はごく簡単な計算で可能である。したがって、大規模システムにおいても実用的な時間で設置点の選定を行うことができる。

〈3・4〉 数値例

〈3・4・1〉 等価インピーダンスの上限がない場合 ここでは、まず〈3・2〉節に示した手法の有効性を検証するため、限流器等価インピーダンスに上限のない場合を考える。モデルシステムとして、図3のNew Englandシステムを用いる。ここでは全てのノードに対し、短絡電流が25.0[pu]以下となるように限流器を設置するものとする。限流器非設置の場合の3LS事故時の短絡電流を計算すると、短絡電流が25.0[pu]を越えるノードは表2に示す9つのノードとなる。図3ではこれらのノードの番号を四角で囲ってある。図3からわかるように、これらのノードは系統内に広く分布しており、どこに限流器を設置すればよいかの判断は容易ではない。

ここで、系統内の送電線ブランチを設置点の候補として、〈3・2〉節に述べた方法で必要となる限流器等価インピーダンスを計算すると表3のようになる。ただし、限流器は等価インピーダンスとしてリアクタンス分のみを持つものとした。表3で“—”となっている欄は得られた等価インピーダンスが負となる場合である。また，“—”となる欄が多いブランチは省略してある。

表3の結果からDに限流器を設置した場合、全てのノードの短絡電流を25.0[pu]以下とすることが可能であり、この設置点が最適な設置点となる。この場合の必要となる等価インピーダンスは、表3でDの列での最大となる0.25607[pu]となる。

Dに $X = 0.25607$ [pu]の限流器を設置した場合と非設置の場合の、各ノードでの3LS事故時の短絡電流の比較を表2に示す。設置時には全てのノードに対して、短絡電流が25.0[pu]以下となることがわかる。

〈3・4・2〉 等価インピーダンスに上限がある場合 次に、限流器の等価インピーダンスの最大値を0.05[pu]とする。〈3・3〉節に述べた手法により、得られた限流器設置点と限流器等価インピーダンスを表4に示す。

表4 限流器設置点の比較

Table 4. Comparison of FCL Configurations

	設置点 (等価インピーダンス)	等価インピー ダンスの和
提案法	A ($X = 0.0500$)	0.0791
	C ($X = 0.0291$)	
最適設置点	A ($X = 0.0490$)	0.0790
	C ($X = 0.0300$)

図6 短絡電流の比較

Fig. 6. Comparison of Fault Currents

提案するアルゴリズムによって得られる限流器設置点の最適性は、保証されない。比較のため、モデルシステムで限流器等価インピーダンスの和が最小となる組合せを、実際に限流器を設置したと仮定して短絡電流計算を行うことにより探索した結果、得られた最適設置点を表4に示す。限流器設置点数が最小であるのは自明であるため、設置点数は2箇所に固定して、探索をおこなった。その結果、561通りの限流器の設置パターンに対しての短絡電流計算が必要となり、その上、等価インピーダンスの和の最小値の探索のために、さらに試算が必要となる。これに対し、提案法では短絡電流計算の数倍の処理時間で、効率良く設置点を算出することができる。

表4から提案法による設置点と最適設置点の限流器設置箇所は同じであり、等価インピーダンスの和もほとんど差がないことがわかる。限流器を設置した場合の短絡電流を比較すると図6からわかる通り、ほとんど両者に差がない。以上のことから、提案法により得られた限流器設置点は最適な設置点とほぼ同等のものであるといえる。

4. まとめ

本稿では、短絡電流計算への電流制限型限流器の組み込みと、短絡電流低減のための限流器の設置点について検討を行なった。

短絡電流計算への電流制限型限流器の組み込みについては、電流制限型限流器の等価インピーダンスを動作条件およびネットワークのインピーダンスから簡単な計算

表3 必要となる限流器等価インピーダンス

Table 3. Required Impedance of FCL

設置点 ブランチ	短絡電流軽減対象ノード								
	2	3	4	14	15	16	17	18	24
A	0.03931	0.05365	—	—	0.03389	0.17130	0.01727	0.00847	0.01276
B	—	—	0.01634	0.00421	0.00305	—	—	—	0.04264
C	—	—	0.01634	0.00421	0.01321	—	—	—	0.04264
D	0.12185	0.14655	0.03520	0.01884	0.03465	0.25607	0.17599	0.04901	0.02866
F	0.01425	0.02866	0.02394	0.01851	0.12308	—	—	0.03809	0.15279
E	0.02818	—	0.21065	0.16766	—	—	—	—	—
G	0.17893	0.05351	0.00686	0.00892	—	—	—	0.13159	—
H	0.22625	0.03788	0.11261	—	—	—	0.28405	0.00924	0.08869
I	0.22625	0.03788	0.11261	—	—	—	0.28405	0.00481	0.08869
J	—	—	—	4.89917	0.53638	—	—	0.93486	0.13536
K	—	—	—	4.89927	0.53638	—	—	0.93486	0.13536

で得ることができ、電流制限型限流器による限流効果を効率良く計算できることを明らかにした。

電流制限型の限流器として、例えば整流器型限流器を考えた場合、〈2・1〉節に述べた限流比 α が複素数になる。これは限流器の動作により、電流位相が変化するためであり、その位相変化の大きさは制限電流の大きさと系統条件により左右される⁽⁴⁾。限流器のタイプにより、限流比にどのような条件が生じるかを明らかにし、手法に反映させていくことが、今後の課題の一つである。

限流器の設置点については、短絡電流低減のために必要となる等価インピーダンスを用いて、簡単な論理により、効果的な設置点を選定できることを明らかにした。その際、等価インピーダンスの上限値などの現実的な制約条件を考慮することが可能であることを示した。本稿では短絡電流の低減を目的としたが、遮断器の遮断責務を低減することを目的とした定式化も同様に可能である。

提案法は設置点の最適性を保証するものではないが、数値例を用いて、提案手法により得られた設置点が、限流器設置点数の最小化と限流器等価インピーダンスの和の最小化という観点から、ほぼ最適なものであることを示した。系統に限流器を設置することにより、系統内の全ての事故点での短絡電流は必ず減少する、すなわち短絡電流の低減という観点からは、限流器の設置によるトレードオフの発生はない。このことから、提案手法のような単純なアルゴリズムを用いても最適解に十分近い解が得られるものと考えられる。なお、電流の回り込みによって、かえって限流器非設置のブランチでの短絡時電流が増加することがあるのは、〈2・2〉節での例に示した通りである。

本稿での検討は、1節に述べたように、短絡電流計算をベースとしており、限流器の動作完了に至るまでの過渡状態の挙動（例えば過渡的な過電流や最終インピーダンスに達するまでの過電圧の発生の有無など）は考慮していない。したがって、本稿の論理で求まる限流器設置点は、その候補点となるものと考えべきである。

限流器の詳細な動作特性の解析により、本稿では考慮

しなかった制約条件が明らかとなる可能性があり、また、系統運用上の種々の制約も考慮する必要があると考えられる。これらの制約は現段階では必ずしも明確なものではないため、本稿では考慮しなかった。これらの制約を考慮した、より現実的な設置点選定にあたっては、最適化手法の利用を必要とする場合もありうるものと思われる。

最後に、本研究を進めるにあたり有益なご助言をいただいた電力中央研究所 高橋一弘 理事ならびに谷口治人 電力システム部長に感謝の意を表します。

（平成 11 年 2 月 19 日受付、同 11 年 7 月 30 日再受付）

文 献

- (1) 電気協同研究会：「電力系統における短絡電流計算法」，電気協同研究，20，6（昭 39-8）
- (2) 電気学会：「故障電流抑制用限流技術の現状と展望」，電気学会技術報告，709，（平 11-1）
- (3) 例えば，NEDO：「超電導電力応用技術開発 トータルシステム等の研究 導入効果の調査研究」（平 7-3）
- (4) H. Kameda and H. Taniguchi: "Setting Method of Specific Parameters of a Superconducting Fault Current Limiter Considering the Operation of Power System Protection", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 1999 (to be published)
- (5) 多田，岡本，栗田，関根：「電圧安定度維持と短絡容量低減を同時に注目した系統構成検討手法」，電学論 B，116（平 8-12）
- (6) 関根，仁田，相山：「故障電流抑制超電導限流器を含む電力系統の故障計算法」，電学論 B，113（平 5-5）
- (7) 高橋：「電力システム工学」，コロナ社（昭 52）
- (8) 田中，高橋：「短絡容量計算に用いる Z 行列要素の効率的な修正手法」，電学論 B，113（平 5-2）

永 田 真 幸（正員） 昭和 43 年 11 月 30 日生。平成 3 年 3 月 東京大学工学部電気工学科卒業。8 年 3 月同大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士（工学）。同年 4 月（財）電力中央研究所入所。現在に至る。主に電力系統の解析に関する研究に従事。

田 中 和 幸（正員） 昭和 26 年 12 月 30 日生。76 年 3 月九

州大学大学院修士課程（電気工学）修了。同年 4 月（財）電力中央研究所入所。主として電力系統の計画・運用・解析に関する研究に従事。81 年 8 月～82 年 9 月米国テキサス大学客員研究員。91 年 10 月～92 年 7 月九州工科大学客員助教授。工学博士。