オープンアクセス環境下における FACTS 機器に対する託送コスト算定に関する基礎検討

学生員 高橋 一成 (北海道大学) 正員 北 裕 幸 (北海道大学)
 学生員 山口 順之 (北海道大学) 正員 西谷 健一 (北海道工業大学)
 正員 長谷川 淳 (北海道大学)

A Study on Wheeling Costs Allocation in Power Systems with FACTS Devices

Issei Takahashi, Student, Hiroyuki Kita, Member, Nobuyuki Yamaguchi, Student (Hokkaido University), Ken-ichi Nishiya, Member (Hokkaido Institute of Technology),
 Jun Hasegawa, Member (Hokkaido University)

Abstract

By a trend of recent worldwide deregulation, the electric power systems in Japan is approaching towards the open transmission access. Currently retail wheeling regulations are discussed in legislation for the future electric power systems operation. In a case that the retail wheeling regulations are introduced, it is necessary to evaluate the influence on power system operation rightfully and guarantee equity and transparency in the charges imposed on users of transmission facilities. When the retail wheelings are added in the power system with FACTS devices, it is necessary to allocate costs of FACTS devices among each retail wheeling depending on degree of their influences on power system operator.

This paper presents an index that what degree some FACTS devices are responsible for congestion relief. And, Its index is allocated according to the retail wheelings' influences for congestion. Also, this paper verifies the validity of the proposed index using IEEE 14 system.

キーワード: 規制緩和、FACTS 機器、託送コスト、混雑負担指標、最適潮流計算

1. まえがき

近年の世界的な規制緩和の流れに伴い、わが国の電力系統も部分的ではあるが小売託送の導入が可能となり、系統へのオープンアクセスが現実のものとなりつつある。ネットワークへのアクセスが様々な地点で自由にしかも頻繁に行われる状況においては、ネットワーク内の電力潮流は複雑に変化するため、新規参入者の数が増えるにしたがって系統の制御は極めて難しくなると考えられる。このようなオープンアクセス環境下の電力系統を適切に制御する手段として、高速化、大容量化の著しいパワーエレクトロニクス技術を利用した FACTS(Flexible AC Transmission System)機器^{[1][2]}の導入が注目されてきている。FACTS 機器は、ネットワーク潮流を高速かつ連続的に制御することができるため、電力系統の安定度を向上させる^[3]と共に、潮流フローの高速制限や一時回避など、従来の方法にはない柔軟な潮流制御^[4]を行うことが可能である。このため、予期せぬ外乱や負荷の変化はもちろん、小売託送導入に伴う潮流状態の複雑な変化に対しても、適切に対処できるものと期待されている。

ところで、オープンアクセス環境においては、具体的な託送料金を算定するための目安として、各託送のネットワーク利用にかかるコスト(託送コストと呼ぶ)をそれぞれの託送パターンに応じて正しく公平に評価することが必要である^[5]。このとき、ネットワークに配置されている FACTS 機器がある参加者の託送要求を満たすために有効に働いているとすれば、その託送は「FACTS 機器を使用することでメリットを得ている」と考えることができ、その使用料に相当する分をも、託送コストに含めて評価する必要があると考えられる^{[6][7]}。FACTS 機器に関するコストの具体的な配分については文献(6)、(7)において、直流法潮流計算を用いた有用な手法が提案されており、オープンアクセス環境下での FACTS 機器の固定費と可変費の配分方法について述べられている。しかしながら、本手法では、FACTS 機器のコストは FACTS 機器の設置されている線路に流れる潮流に基づき配分されているため、FACTS 機器が持つ系統全体に対する潮流制御特性を十分に考慮し、その影響に応じてそのコストを配分しているとはいえない。特に、FACTS 機器の可変費に相当する分については、サセプタンスの変化量(制御量)を目安とし

て各参加者から公平に徴収することが述べられているが、すべての FACTS 機器に全く同じ条件で平等にコスト配分することは難しい。

本論文では、直列型 FACTS 機器を含む電力ネットワークにおいて、各託送が直列型 FACTS 機器にどの程度影響を与えているかをオンラインで定量的に評価することができる新しい指標¹⁸⁾を提案する。すなわち、FACTS 機器の基本的な役割を、ネットワーク全体の送電損失を最小にすることと仮定すると、提案指標は、託送に伴って発生する混雑(過負荷)を解消するために、損失最小化を犠牲にして行っている FACTS 機器の制御負担を定量的に表すものである。従って、この値を混雑を引き起こしている影響度に応じて各託送に配分することで、各託送とそれぞれの FACTS 機器の制御負担とを明確に関係づけることが可能となり、FACTS 機器を考慮した託送コストを算定することができる。

以下本論文では、第 2 章において、オープンアクセス環境において電力ネットワークに要求される機能を明確にすると共に、その中での直列型 FACTS 機器の役割について整理する。第 3 章では、FACTS 機器に対する託送コストを算定するための指標を定義し、第 4 章では、モデルシステムを用いた試算によりその提案指標の特徴を明確にする。

2. オープンアクセス環境における電力ネットワークと FACTS 機器の機能

オープンアクセス環境において、電力ネットワークはいわゆる「競争の場を提供するインフラ」としての機能を有するため、従来以上に公平・公正な運用・計画が求められる。すなわち、将来の電力ネットワークは、(1)任意のアクセス要求に確実に応じることができるよう、十分な送電余力を確保する(輸送能力の確保)と共に、(2)エネルギー有効利用の観点から、託送を含む電力輸送における損失を可能な限り少なくすること(送電損失の低減)が望まれる。また、(3)ネットワーク利用にかかる託送コストを、各参加者の託送パターンに応じて正しく公平に評価することも重要な機能と考えられる。(1)については、将来の需要動向を見据えて、送電線増強、新規ルートの拡大、等、適切な流通設備計画を行うことが重要と考えられるが、送電線建設に関する立地面あるいは環境面の制約により、十分な対策を行うことが次第に困難になってくると予想される。また、託送がネットワークのどこにどれだけ導入されるかといった新たな不確定要因も発生し、計画の立案が極めて難しくなるという可能性もある。一方、(2)については、一般に能動的な潮流制御機能を持たない送電部門のみでは対処することが難しく、現状では電気事業者の所有する発電機の出力調整によって対応する必要がある。ただし、この場合、経済運用の状態からは大きく異なった運用を強いられる可能性があるため、他電源との直接的な競争にさらされる発電部門に対してのみ、適切な補償がないままこうした付加的な機能を課すことは、必ずしも得策とは言えない。

これに対して FACTS 機器は、上記の 2 つの課題を同時に解決するための有効な手段として注目されてきている。

FACTS 機器を電力ネットワークに配置することで、潮流フローの高速制限や一時回避などの制御能力をネットワーク自身が持つことになり、既存のネットワークを最大限まで活用し、高効率のネットワーク運用を行うことが可能となる。すなわち、常時から系統全体の送電損失を最小化しながら、託送等に伴って生じる混雑(過負荷)を解消することで、多くの参加者に対して公平にネットワークを利用する機会を与えることが可能になる。このように、FACTS 機器は、オープンアクセス環境において極めて重要な役割を演ずることになり、規制緩和の進行に伴いその導入量はますます増加するものと予想される。

ところで、FACTS 機器の設置及び運用にかかるコストは、ネットワークを利用する全ての参加者によって応分に負担されるべきであると考えられ、(3)で述べた託送コストにはこの分のコストも含めることが必要である。次章では、各小売託送に対するコスト負担を適切に算定するために、託送が電力系統に与える影響と FACTS 機器の潮流制御特性を考慮した指標を提案する。

3. 最適潮流計算に基づく FACTS 機器の混雑負担度

<3.1> オープンアクセス環境における直列型 FACTS 機器の最適運用

前章で述べたオープンアクセス環境における FACTS 機器の基本的な役割を考慮し、直列型 FACTS 機器は以下の問題を最適化するように運用されているものと仮定する。ここで、直列型 FACTS 機器としては、移相器や TCSC を考え、文献(9)にあるようにモデル化する(付録 A)。

$$\min_{P_k^F} f = \sum_{i \in bus} \sum_{j \in bus} P_{ij} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P_k^F : k 番目の FACTS 機器が制御する有効電力潮流、N: 母線数、 P_{ij} : 送電線 #i-#j に流れる有効電力潮流。

制約条件は、次式の線路潮流制約、および潮流方程式である。

$$\text{subj.to} \quad P_{ij} - \bar{P}_{ij} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$P_i^{\text{INJ}} = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad i=1, \dots, n \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\bar{P}_{ij}$: P_{ij} の上限値、 P_i^{INJ} : 母線 i の注入電力

なお、この他に FACTS 機器の制御量に対する上下限制約が存在するが、ここでは FACTS 機器の混雑解消に対する効果を評価することを目的としているため、この制約条件はあえて考慮しないこととした。

(1)、(2)式の問題に対する Lagrange 関数は、次式のようになる。なお、潮流方程式に対する Lagrange 関数は式が煩雑になることを避けるため記述を省略する。すなわち、潮流方程式を含めて理論展開を行っても、以下に述べる本論文の主旨は何ら変わることはない。

$$L = f + \sum_{i \in bus} \sum_{j \in bus} \eta_{ij} (P_{ij} - \bar{P}_{ij}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、最適解であるための必要条件は Kuhn-Tucker の定理より次式のように与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial P_k^F} = \sum_{i \in \text{bus}} \sum_{j \in \text{bus}} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_k^F} + \sum_{i \in \text{bus}} \sum_{j \in \text{bus}} \eta_{ij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_k^F} = 0 \\ \eta_{ij} \geq 0 \quad (P_{ij} - \bar{P}_{ij} = 0) \\ \eta_{ij} = 0 \quad (P_{ij} - \bar{P}_{ij} < 0) \end{array} \right. \quad \cdots (5)$$

〈3.2〉 FACTS 機器の混雑負担度の定義 本論文では、(5) 式を満足する Lagrange 乗数 η_{ij} を用い、ある参加者 α が k 番目の FACTS 機器にどのような影響を及ぼしているかを定量的に表す次式の指標を定義する。

$$CBIF_k^\alpha = \sum_{i \in \text{bus}} \sum_{j \in \text{bus}} \eta_{ij} \left| \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_k^F} \right| \frac{P_{ij}^\alpha}{P_{ij}} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

ここに、 P_{ij}^α : 送電線 i — j の有効電力潮流のうち、参加者 α により変化した有効電力潮流

この指標は次のような意味を持っている。まず、Lagrange 乗数 η_{ij} (≥ 0) は、潮流が制約値に張りついている送電線 i — j において、仮に微小量の制約逸脱を許容すると、目的関数である送電損失を更にどの程度減少させることができるかを表すものである。当然、この値が大きい送電線潮流ほど、過負荷を解消し潮流を制約値に張り付けるために、送電損失の減少を大きく犠牲にしなければならない厳しい潮流であるとみなすことができる。すなわち、 η_{ij} の値は制約条件の「過負荷解消」と目的関数の「送電損失最小化」との間の相対的な関係を表すものと考えることができる。

一方、 $|\partial P_{ij} / \partial P_k^F|$ の値は、 k 番目の FACTS 機器を微小量制御することで、送電線 i — j の潮流がどの程度変化するかを、絶対量として表したものである。ここで、 $\partial P_{ij} / \partial P_k^F$ の符号は、FACTS 機器の制御量を増加させることによって、潮流 P_{ij} が増加することになるのかあるいは減少することになるのかを表すものである。本論文では、潮流制約に対する効果の度合いを量的に評価するために、この値を絶対値で算定することとした。これにより、どの FACTS 機器に対しても同じ正の符号で評価され、このことは「FACTS 機器を潮流が制約を逸脱する方向に制御する」として潮流変化に対して同じ条件を考えたことに相当する。

従って、これら乗じた $\eta_{ij} |\partial P_{ij} / \partial P_k^F|$ の値は、FACTS 機器を微小量制御することにより送電線 i — j の潮流の制約逸脱が許された場合、送電損失を更にどの程度減少させることができるのかを、各 FACTS 機器毎に示すことになる。実際には、潮流制約逸脱を引き起こしてしまうので、その制御を行うことはできず、FACTS 機器が本来の送電損失最小化の点まで制御できない状態で最適解となっている。つまり、この指標によってどの程度損失最小化を犠牲にしているかを表すことになり、当然、値が大きいほど、FACTS 機器による損失最小化のための制御が、潮流制約によって大きく制限されていることを示す。従って、その潮流過負荷に関与している

参加者には FACTS 機器の制御負担に対して、より多くの責任（負担）を求めることが妥当と考えられる。そこで、各過負荷線路に対する $\eta_{ij} |\partial P_{ij} / \partial P_k^F|$ の値に、その線路潮流の分担割合を表す P_{ij}^α / P_{ij} を掛け合わせることで、参加者毎にその責任量を配分している。

また、混雑がなければ、当然のことながら FACTS 機器は、送電損失最小化の機能を最大限果たすことができることになる。この場合には、 η_{ij} の値が零となり、各参加者の責任負担は発生しない。

なお、送電線 i — j の有効電力潮流のうち、託送 W により変化した有効電力潮流 P_{ij}^W は、近似的に以下のように求めることとする。すなわち、まず、FACTS 機器によって制御が行われた現在の潮流状態において、託送が導入されていない各線路の潮流は次式に従って変化すると考えられる。

$$\tilde{P}_{ij}^W = \sum_{m \in \text{bus}} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_m} (P_m^{\text{GW}} - P_m^{\text{DW}}) \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

ただし、 P_m^{GW} : 母線 m につながる託送 W の発電電力、 P_m^{DW} : 母線 m につながる託送 W の負荷電力

ここで、(7)式は、前述のごとく、潮流が制約に張り付いている送電線 i — j に対して、その送電線に各託送がどういう割合で潮流を流しているかを線形近似により評価するものである。つまり、託送によって、送電側母線 m から P_m^{GW} という電力がネットワークに流入し、受電側母線 m で P_m^{DW} という電力がネットワークから引き出されているとき、仮にその託送がなくなると、送電線 i — j の電力がどれだけ変化するかを表すものである。従って、この値を託送によって送電線 i — j に流れている電力と見なすことができる。なお、ここでは注入電力の方向を正としているので、後者の値には負の符号が付いている。

同様に、電気事業者に対しても、その分担分を公平に評価する必要がある。電気事業者が一般負荷に電力を供給することで送電線潮流が発生するため、仮にその行為（電気事業者の発電機がネットワークに電力を注入し、一般負荷がネットワークから電力を引き出す）を行わなければ、送電線 i — j 間の潮流はどれだけ変化するかを次式によって求め、電気事業者の負担分を算定する。

$$\tilde{P}_{ij}^U = \sum_{n \in \text{bus}} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_n} (P_n^{\text{GU}} - P_n^{\text{DU}}) \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

ただし、 P_n^{GU} : 母線 n につながる電気事業者の発電電力、 P_n^{DU} : 母線 n につながる電気事業者の負荷電力

すなわち、(7)式と(8)式の比は託送と電気事業者の注入電力による P_{ij} への影響の度合いを表していると考えられる。なお、いずれも線形近似によって値を算定しているため、両者の和は実際の線路潮流とは等しくならない。そこで、両者の分担割合(比率)のみを(7)、(8)式から求めることとし、両者の和が実際の潮流に等しくなるように、次式に基づいて修正を行い、各参加者により変化した有効電力潮流を求

めることとする。

$$P_{ij}^a = \gamma_{ij} \tilde{P}_{ij}^a \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\gamma_{ij} = P_{ij} / \sum_{a \in \text{Utility, Wheel}} \tilde{P}_{ij}^a \quad \dots\dots\dots (10)$$

4. 提案する混雑負担指標の特徴

本章では、提案した混雑負担指標の特徴を、図1の IEEE14 母線系統を用いて検証する。なお、前章で述べたように FACTS 機器は線路潮流制約のもとで送電損失を最小化するように運用されているものとするが、同時に電気事業者の発電機有効電力の制御も考慮し、送電損失をさらに減少させると共に、FACTS 機器のみでは対処できない過負荷の解消を行う(具体的な運用状態の計算アルゴリズムを付録Bに示す)。また、本試算における過負荷線路はすべて#9-#14である。

＜4.1＞ 送電容量の変化に伴う混雑負担指標の変化 はじめに、#7-#14の託送 10[MW]を含む系統において、系統の負荷、託送電力を共に変化させずに、#9-#14線路の送電容量のみを変化させ、#10-#9に設置された直列型 FACTS 機器制御後の送電損失の値とそれに伴う電気事業者の総発電コストを求めた。得られた結果を図2に示す。線路潮流の制約を厳しくするに従って、過負荷を解消するために送電損失の最小化を大きく犠牲にしなければならず、送電損失の値が増加していることがわかる。ここで、送電損失が二次関数的に変化するのは、直列型 FACTS 機器の制御は注入電力の変化と等価であり、しかも送電損失は近似的に注入電力の二次形式で表されるからである。図3は、それぞれの状態に対して提案指標(CBIF)の値を計算したものであるが、託送と電気事業者のCBIFの和は、ほぼ一律に増加していくのが分かる。前述のごとく、CBIFの値は FACTS 機器の制御によって送電損失をさらにどの程度減少させ得るかを表す値であるため、図2のような送電損失の非線形的な変化に伴い指標の値はほぼ直線的に増加する。

図1 IEEE14 母線系統
Fig. 1. IEEE 14 system.

また、図4は(7)~(10)式から求めた過負荷線路の潮流割合を表している。潮流制約が厳しくなると、FACTS 機器による過負荷解消に伴う送電損失の増加を、電気事業者の発電電力を大幅に調整することで、補償することになる。これにより、過負荷線路における電気事業者の潮流割合が変化し、それに伴い、図3のように混雑全体に占める電気事業者の CBIF の割合も変化している。以上のことから、CBIF は混雑改善に伴う FACTS 機器の負担度を定量的に表していることが分かる。

図2 線路容量の変化に伴う送電損失とコストの変化
Fig. 2. Cost and Loss evaluation.

図3 線路容量の変化に伴う指標の値
Fig. 3. Index evaluation.

図4 線路容量の変化に伴う線路潮流の変化
Fig. 4. Approximate power flow evaluation.

＜4.2＞ 託送電力の変化に伴う混雑負担指標の変化

＜4.1＞においては、送電容量を変化させて混雑負担指標の値の変化を検証したが、ここでは混雑度を一定のまま託送電力を変化させて混雑負担指標の値の変化を検証する。

混雑の負担の度合いを示す CBIF の値を一定にするために、託送電力を増減させたときに、常に送電線#9-#14 に 2 [MW] の過負荷が発生するように、送電線#9-#14 の送電容量の値を変化させた。託送は#7→#14 を考え、この託送を +10[MW]～-6[MW] の間で変化させたときの混雑負担指標 (CBIF) の値を図 5 に示す。FACTS 機器は#10-#9 に設置した。

どの系統状態に対しても一定の過負荷が発生するようにしたことで、電気事業者と託送の CBIF の和はほぼ一定になっている。しかし、託送電力を減少させるとともに、託送に関する CBIF の値は減少していることがわかる。逆潮流となるような負の電力が託送されている場合についても、CBIF の値は負となっており、逆潮流が増えるとその CBIF の値もますます小さくなっていくことがわかる。これより、CBIF は託送電力量の大小による影響を適切に表していることが分かる。

＜4.3＞ FACTS 機器の設置位置に伴う混雑負担指標の変化

次に、一台の直列型 FACTS 機器の設置位置を様々に変えて、CBIF がどのように変化するかを考察する。ここでは、FACTS 機器の設置位置として、代表的な#10-#9、#11-#10、#6-#13、#12-#6 の 4 つの線路を候補とし、その結果を表 1 にまとめている。#7→#14 に 10[MW] の託送を仮定し、過負荷線路である#9-#14 の送電容量は 15[MW] とした。まず、最初の三つの設置位置は最適潮流計算の結果から表 1 にあるように、制御後の送電損失の値はほぼ等しく、過負荷解消に対する寄与の度合いが同程度であることがわかる。同表から提案指標はそれを適切に表していることがわかる。

一方、#12-#6 は最適潮流計算の結果から FACTS 機器の過負荷解消に応じて、発電機出力を大幅に調整しなくてはならない設置位置である。この設置位置は、＜4.1＞で確認したように、発電機出力の調整に伴い、結果として送電損失が増加し、FACTS 機器を単単位量変化させたとき送電損失の値が大きくなるため、CBIF の和が 1.388×10^{-1} と、他と比べて非常に大きくなったものと考えられる。

以上のことから、混雑改善に対する FACTS 機器の負担の度合いを定量的に評価する CBIF の値を参考にすれば、ある想定した送電線の混雑に対して、適切な FACTS 機器の設置個所を見出すことができる。

＜4.4＞ 複数の託送に対する混雑負担指標の算定

二種類の託送が同時に系統に導入されているとき、各託送について混雑負担指標を算定する。ここで、FACTS 機器は#10-#9 に設置されており、過負荷線路である#9-#14 の送電容量は 15[MW] とした。

(1) 複数の混雑を増加させる託送について #7→#14、#6→#13 の二つの託送はどちらも託送電力は同じであるが、過負荷線路である#9-#14 線路に流れる託送潮流は系統図か

ら明らかなように#7→#14の方が大きいと考えられる。このときの混雑負担指標の値を表 2 に示す。この条件のもとでの混雑負担指標の値は、#7→#14 に対しては 1.737×10^{-2} 、#6→#13 に対しては 2.346×10^{-3} 、電気事業者に対しては 2.895×10^{-2} となっており、その影響の大きさを適切に表している。

(2) 混雑を増加させる託送と混雑を解消する託送について

#7→#14、10[MW]、#13→#6、10[MW] の二つの託送のうち、#7→#14 の託送は混雑を増加させるような託送であるが、#13→#6 は逆に混雑を解消するように働く託送である。このときの混雑負担指標の値を表 2 に示す。この条件のもとでの混雑負担指標の値は、#7→#14 に対しては 5.956×10^{-3} 、#13→#6 に対しては -7.619×10^{-4} 、電気事業者に対しては 1.001×10^{-2} となっており、この結果は再び妥当なものである。

＜4.5＞ 複数の FACTS 機器に対する混雑負担指標 続いて、系統内に二台の FACTS 機器を同時に設置し、託送を一つ導入した際の CBIF について試算を行う。FACTS 機器は#10-#9、#12-#6 の線路に設置され、託送は#7→#14 に 10[MW] 導入されるものとする。また過負荷線路である#9-#14 の送電容量は 14[MW] とした。その結果を表 3 に示す。

図 5 託送電力の変化に伴う指標の値

Fig. 5. Changing Wheeling's index evaluation

表 1 FACTS 機器の設置位置に伴う各値の変化

Table 1. FACTS location loss, cost and index table.

FACTS 設置位置	#10-#9	#11-#10	#6-#13	#12-#6
CBIF total	3.174×10^{-2}	3.130×10^{-2}	2.483×10^{-2}	1.388×10^{-1}
CBIF[#7→#14]	1.187×10^{-2}	1.409×10^{-2}	8.067×10^{-3}	5.421×10^{-2}
CBIF[Utility]	1.987×10^{-2}	1.720×10^{-2}	1.676×10^{-2}	8.462×10^{-2}
送電損失 [MW]	17.40	17.39	17.38	18.49
Total Cost [yen]	3.198×10^6	3.197×10^6	3.197×10^6	3.218×10^6

表 2 複数の託送に対する指標の値

Table 2. Wheelings' index evaluation.

#7→#14 & #6→#13		#7→#14 & #13→#6	
CBIF[#7→#14]	1.737×10^{-2}	CBIF[#7→#14]	5.956×10^{-3}
CBIF[#6→#13]	2.346×10^{-3}	CBIF[#13→#6]	-7.619×10^{-4}
CBIF[Utility]	2.895×10^{-2}	CBIF[Utility]	1.001×10^{-2}
送電損失 [MW]	17.91	送電損失 [MW]	17.12
Total cost [yen]	3.207×10^6	Total cost [yen]	3.192×10^6
#9-#14 潮流 [#7→#14]	5.354[MW]	#9-#14 潮流 [#7→#14]	5.876 [MW]
#9-#14 潮流 [#6→#13]	0.7228[MW]	#9-#14 潮流 [#13→#6]	-0.7515 [MW]
#9-#14 潮流 [Utility]	8.922 [MW]	#9-#14 潮流 [Utility]	9.875 [MW]

表 3 複数の FACTS 機器に対する指標の値

Table 3. Two FACTS' CBIF evaluation.

FACTS 機器	CBIF Total	CBIF[#7-#14]	CBIF[Utility]
#10-#9	4.506×10^{-2}	1.633×10^{-2}	2.872×10^{-2}
#12-#6	1.365×10^{-2}	4.952×10^{-3}	8.705×10^{-3}
送電損失 [MW]	17.50		
Total cost [yen]	3.200×10^6		

小売託送と電気事業者の CBIF の値を足し合わせた値は、#12-#6 の FACTS 機器に対しては 1.365×10^{-2} で、#10-#9 の FACTS 機器に対しては 4.506×10^{-2} であり、#12-#6 の FACTS 機器に比べ約 3.2 倍の負担度となっている。<4.3>の結果より、送電線#9-#14 の過負荷に対しては、#12-#6 よりも#10-#9 に FACTS 機器を設置した方が負担を増加させずに混雑を解消できることがわかっており、上記の値は妥当なものであると考えられる。以上のことから、複数の FACTS 機器が系統に設置された場合に対しても、混雑負担指標は混雑改善に対して、各 FACTS 機器の設置位置により異なる負担の度合いを個別に求められることが確認された。

5. むすび

本論文では、FACTS 機器の中でも潮流制御性能の高い移相器に着目し、オープンアクセス環境下において、FACTS 機器が設置されたネットワークに小売託送が導入されると、個々の小売託送がネットワークへ与える影響を正しく評価し、FACTS 機器の設備固定費を託送料金の一部として各小売託送へ配分するため、過負荷線路の混雑の度合いを定量的に表すことのできる混雑負担指標を提案した。また、各過負荷線路ごとに、小売託送のみでなく電力会社を含めた全ての電力取引に対して、本指標を公平に配分する手法を開発した。そして、様々な試算例を用いて、本指標が過負荷線路の混雑の度合いとすべての参加者のネットワークへ与える影響を定量的に表すことを確認した。

今後は、最適潮流計算を行う際に、更に詳細なモデル化を行い、様々な FACTS 機器についての更に詳細な比較、検討を行うとともに、種々の目的関数に対して最適潮流計算を行った場合の運用コストの比較や、混雑負担指標の検討、更には電圧制約など他の制約条件に対する混雑負担指標の検討等についても拡張を図ることが重要と考えている。

(平成 11 年 12 月 06 日受付、平成 12 年 07 月 12 日再受付)

参考文献

- [1] N.G.Hingorani, "Flexible ac transmission", IEEE SPECTRUM April, 1993.
- [2] 栗田, 「米国電力研究所の FACTS 構想」電力中央研究所報告、調査報告 T92020、平成 5 年 3 月
- [3] 河野、横山, 「UPFC の電力系統安定化制御に関する基礎的検討」電気学会電力技術・電力系統合同研究会資料、PE,PSE-97-168、平成 9 年 10 月
- [4] 三谷、辻, 「直列リアクタンスによる送電損失最小化制御」電気学会論文誌 B 118 巻 9 号 pp.962-968 平成 10 年 9 月

- [5] 例えば、浅野, 「競争的電力市場における送電料金設定の現状と課題」電力経済研究 No.38 平成 9 年
- [6] E.J. de Oliveira, et al "Flexible AC transmission system device: allocation and transmission pricing" Electrical Power and Energy Systems 21 (1999) 111-118
- [7] E.J. de Oliveira, et al "Allocation of FACTS Devices in a Competitive Environment" 13th PSCC Vol.1,1184-1189,June,1999
- [8] 高橋、他, 「オープンアクセス環境下における FACTS 機器の機能・役割に関する基礎検討」電気学会電力技術・電力系統合同研究会資料、PE-99-60,PSE-99-57、平成 11 年 9 月
- [9] D.J.Gotham, G.T.Heydt "POWER FLOW CONTROL AND POWER FLOW STUDIES FOR SYSTEMS WITH FACTS DEVICES" IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.1, February 1998

付 録 A

文献(9)に基づく直列型 FACTS 機器のモデル化の概要

本研究において、直列型 FACTS 機器を考慮した最適潮流計算を行うことを考えるが、その際の FACTS 機器のモデル化としては従来の潮流計算に組み込みやすいことから、文献(9)に基づいて、付図 1 のようなモデル化を行うこととする。

付図 1 の等価モデルでは、直列型 FACTS 機器の設置される母線に仮想母線を挿入し、指定した有効電力を直列型 FACTS 機器の設置する負荷母線から吸収し、その有効電力を仮想母線に注入することで送電線に指定した有効電力潮流を流すことができる。また、無効電力潮流については、(付 1)式より、送電線の両端の母線の電圧から、送電線#i-#j に流れるべき無効電力潮流を計算し、その無効電力潮流の値を直列型 FACTS 機器の設置する負荷母線から吸収し、同じ値を仮想母線に注入することで等価的に無効電力が流れるようにしている。その後、(付 2)式を用いて仮想母線の電圧ベクトルを求め、潮流計算を行っている。

$$Q_{ij} = \text{Im} \left\{ (V_i - V_j)^* \bar{y}_{ij} V_i \right\} \quad \text{.....(付 1)}$$

$$P_{ij} + Q_{ij} = (V_i - V_j)^* \bar{y}_{ij} V_i \quad \text{.....(付 2)}$$

付 録 B

算定アルゴリズム

(5)式を満足する最適な FACTS 機器の制御量 P_k^F と η_{ij} の値は以下の方法で算定される。そのフローチャートを付図 2 に示す。

(Step 1) : 前回の潮流計算の結果から求められる送電損失を用い、経済負荷配分に基づき発電機有効電力出力を決定する。その後、FACTS 機器のみで過負荷が解消できるかどうかチェックし、できるなら Step 2 へ、できなければ FACTS 機器により過負荷が解消できるように、発電機出力の調整を行う。

(Step 2) : 前回の計算において過負荷となっていた線路に対する Lagrange 乗数 η_{ij} を更新する。次に、その η_{ij} に対して二次内挿法を用いて $\min L \left(P_k^{F(n-1)} + t \cdot (\partial L / \partial P_k^F)^{(n-1)} \right)$ となる t を探し、FACTS 制御量を $P_k^{F(n)} = P_k^{F(n-1)} + t \cdot (\partial L / \partial P_k^F)^{(n-1)}$ とする。

付図 1 移相器の等価モデル
app. Fig. 1. Equivalent Model of Phase Shifter.

るように変更し、潮流計算(交流法潮流計算)を行う。
(Step 3) : (5)式をチェックし、潮流計算の結果が最適解でなければ Step 2 へ戻る。最適解であるとき、送電損失が Step 1 において用いた送電損失と等しければ(6)式を算出し、終了。等しくなければ Step 1 へ戻る。

付 録 C

系統データ

付表 1 試算系統の負荷の値
app. Table 1. Load data

母線	負荷の値[100MWh] (P,Q)
#1	(0.0,0.0)
#2	(0.217,0.127)
#3	(0.942,0.190)
#4	(0.478,-0.039)
#5	(0.76,0.016)
#6	(0.112,0.075)
#7	(0.0,0.0)
#8	(0.0,0.0)
#9	(0.295,0.166)
#10	(0.090,0.058)
#11	(0.035,0.018)
#12	(0.061,0.016)
#13	(0.135,0.058)
#14	(0.149,0.050)

付表 2 発電機定数
app. Table 2. Generation unit data

母線番号	母線電圧	a [¥/MW ²]	b [¥/MW]	c [¥]
1	1.06	47.6530	76.2262	839.396
2	1.045	65.6130	64.8682	1661.753

付図 2 フローチャート
app. Fig. 2. Flow chart.

高橋 一成

(学生員) 1975 年 5 月 17 日生。2000 年 3 月北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了。同年 4 月東北電力(株)に勤務、現在に至る。規制緩和環境下の電力システムの運用に関する研究に従事。

北 裕幸

(正員) 1963 年 5 月 7 日生。88 年 3 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。89 年 4 月同大学工学部電気工学科助手、95 年 4 月同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻助教授となり、現在に至る。博士(工学)。平成 9 年度論文発表賞受賞。主として、電力システムの計画・運用・制御に関する研究に従事。日本 OR 学会、電気設備学会会員。

山口 順之

(学生員) 1974 年 8 月 5 日生。1999 年 3 月北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了。同年 4 月同大学大学院工学研究科博士課程に進学、現在に至る。主として、電気事業の規制緩和に関する研究に従事。日本 OR 学会学生会員。

西谷 健一

(正員) 1947 年 2 月 11 日生。69 年 3 月北海道大学理学部物理学科卒業。同年 4 月同大学工学部電気工学科助手、同助教授を経て、91 年 4 月北海道工業大学電気工学科教授、現在に至る。工学博士。平成 9 年度論文賞受賞。電力系統工学、特に電力システムの予防制御、系統解析および

各種電源の運用・計画に関する研究に従事。システム制御情報学会、電気設備学会会員。

長谷川 淳

(正員) 1943 年 12 月 13 日生。71 年 3 月北海道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 月同大学工学部電気工学科講師、同助教授を経て、85 年 3 月同教授。95 年 4 月改組により、同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻に配置換えとなり、現在に至る。

工学博士。平成 9 年度論文発表賞受賞。平成 6 年度 B 部門長、同 9 年度副会長(調査担当)。主として、電力系統の計画・運用・解析・制御およびエネルギー工学全般に関する研究に従事。IEEE、照明学会、エネルギー・資源学会、低温工学協会、日本 OR 学会、電気設備学会、等、会員。