

〈一般研究課題〉 電気エネルギー流通システムの  
信頼度と経済性の両立に関する研究  
助成研究者 名古屋大学 小島 寛樹



## 電気エネルギー流通システムの 信頼度と経済性の両立に関する研究

小島 寛樹  
(名古屋大学)

### Optimization of balance between reliability and cost efficiency in electric power transmission and distribution systems

Hiroki Kojima  
(Nagoya University)

#### Abstract :

In order to maintain the high efficiency and high quality of transmission and distribution system for next generation, the authors have proposed “Intelligent Grid Management System (IGMS)”. In this paper, the optimum control and maintenance of power apparatus in a 275 kV / 77 kV transmission and distribution model system with 7 transformers and 26 circuit breakers are derived by IGMS with the degradation control and the strategic maintenance of power apparatus. Since the transformers are to be degraded with the increase in their winding temperature, IGMS can mitigate the degradation of an aged transformer by reducing the load or power flow of the aged transformer and taking the burden on the younger transformers. IGMS can also provide the maintenance (regular, overhaul, replacement) strategy with the optimum timing for each power apparatus through the balance between the maintenance cost and the failure risk to be avoided by the maintenance. Since the degradation control and the strategic maintenance of power apparatus are closely correlated, IGMS can derive the optimum solution in consideration of the above both operations simultaneously. The fixed and variable transmission and distribution costs for 30 years with and without IGMS are calculated, and the cost reduction effect by IGMS is evaluated. As the result, IGMS is expected to bring about the reduction of variable cost by as high as about 66% than that without IGMS.

## 1. はじめに

東日本大震災などの大規模災害を経て、生活基盤を支える一次インフラとしての電気エネルギー流通システムは、ますますその重要性を増しており、さらなる高効率化や安定化が望まれている。一方で、日本の電力システムは高度経済成長期に導入された経年機器を多数抱えている。これらの機器は、設計時に見積もられていた寿命30年を超えており、今後の故障率の上昇を考慮して、電力システムの信頼度を維持しつつ、保守の時期を合理的に決定する方法の確立が重要となっている。

近年注目を浴びているスマートグリッドでは、経済性の向上に重点が置かれ<sup>1)</sup>、既設の機器の故障率増加に備えた監視・制御・信頼度維持についてはほとんど考慮がされていない。また、電力システムの経済性が強く求められている現在では、電力システムへの投資や更新が抑制される傾向にある。

そのような中、経年機器を抱えた電力システムの信頼度と経済性の両立がより強く望まれており、本研究課題では、既存機器の診断や劣化予測に基づいた電力システム・機器の運用・制御・マネジメントにおける最適な戦略を導出する手法の確立を目的とする。

## 2. 機器故障リスクを考慮した電力流通コスト最小化

現在の電力系統は多数の電力機器で構成されており、これらの保守方法・時期、また潮流制御などによる運用手法は電力系統の信頼度と経済的負担に大きく影響する。機器の点検・保守、制御の費用を制限すれば、電力系統の信頼度が低下し停電被害の発生確率が高くなる。その結果、需要家の被害、故障した機器の修理費用などが増加するため経済性の低下につながる。また、機器の信頼度を向上することで、このような損害に対する経済性の低下を抑制することができるが、逆に機器の保守・点検、制御を行うための費用が高くなる。したがって、ある信頼度で両者の和(総合経済性)は最小の値を取る。よって、総合経済性が最小となる信頼度を目指すことが電力機器の適切な運用に必要となる。

総合経済性が最小となる系統運用を提案するために、本研究では図1に示すアセットマネジメントとスマートグリッドを包含した運用手法を概念とした「電力系統最適運用システム(Intelligent Grid Management System : IGMS)」の確立を目指す。スマートグリッドの技術を用いることで各機器の状態を把握し、機器の状態に応じた潮流制御が毎時単位で考慮される。また、同時にアセットマネジメントの観点より10年以上先の将来を考慮することにより、総合経済性に最も優れた潮流制御や保守を提案することが可能となる<sup>2),3)</sup>。

IGMSの基本原理は、電力システムに発生する様々な事象をコストに換算し、その総和を目的関

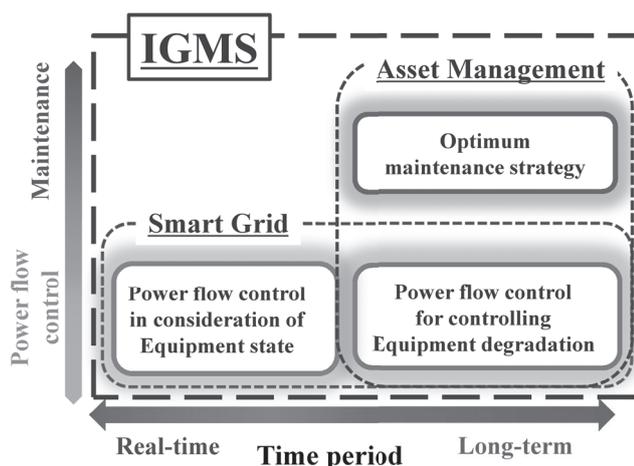


図1 IGMSのコンセプト。IGMSはスマートグリッドとアセットマネジメントの概念を包含している。

数として数理計画法を用いて最小化することにある。本研究で用いた目的関数を式(1)に示す<sup>4)</sup>。

$$\min z = \sum_{YEAR} \left\{ \begin{array}{ll} + \sum_{(i,j) \in Line} a_{ij}(X_{ij}) & + \sum_{(i,j) \in OverLine} b_{ij}(X_{ij}) \\ + \sum_{m \in OverEquip} c_m(X_m) & + \sum_{k \in OutLoad} d_n(X_n) \\ + \sum_{n \in OutLoad} e_n(X_n) & + \sum_{m \in MentEquip} f_m(X_m) \\ + \sum_{k \in PowerEquip} g_k(X_k) & + \sum_{m \in FailedEquip} h_m(X_m) \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $z$ は評価期間での送配電コストの総和である。右辺中括弧内の各項は、

$X_{ij}$ ：変電所(SS) $i$ - $j$ 間の送電電力

$X_m$ ：電力機器 $m$ における電力

$X_n$ ：負荷 $n$ における電力

$X_k$ ：発電所 $k$ における電力

$a_{ij}$ ：定常運転時の送変電損失

$b_{ij}$ ：過負荷運転時の送変電損失

$c_m$ ：過負荷運転による機器の寿命減損

$d_n$ ：需要家の停電被害

$e_n$ ：電力会社の売電機会損失

$f_m$ ：保守費用

$g_k$ ：燃料費用

$h_m$ ：機器の修理費用

*Line*：定常運転時の送電線の集合

*OverLine*：過負荷運転時の送電線の集合

*OutLoad*：停電負荷の集合

*MentEquip*：保守対象となる機器の集合

*FailedEquip*：故障した機器の集合

*PowerEquip*：全発電所の集合

を意味する。上記の目的関数 $z$ を最小とする送電電力 $X_{ij}$ の配分が最適送電ルートとなる。なお、本検討においては簡略化のために燃料費 $g_k$ は発電形態によらないとした。

式(1)を最小化する保守の手法と時期を求めることで、IGMSにより最適保守戦略を導出できる。その際、各機器の故障率を確率的に評価して電力システム運用に要するコストを様々な条件下でシミュレーションする。しかし、検討期間が長くなれば、考慮すべき保守の回数は多くなり、対象とする機器が多くなれば、同時期に考慮すべき保守の組合せが多くなる。そのため、長期間に複数の機器を考慮した最適保守戦略の導出は、現実的な時間では極めて困難となる。そこで、最適保守戦略の導出には、遺伝的アルゴリズム(GA)をIGMSに導入している<sup>5)</sup>。

### 3. 潮流制御による機器劣化制御を考慮した保守戦略

機器の劣化は負荷率に依存することから、系統内の潮流分布を変更することにより、機器の劣化速度の制御が可能となる。そのため、送変電損失を最小とするように決定した潮流分布において一

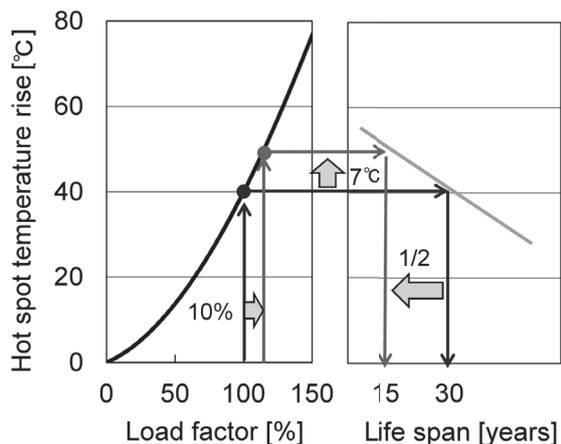


図2 変圧器の劣化速度と負荷率の関係

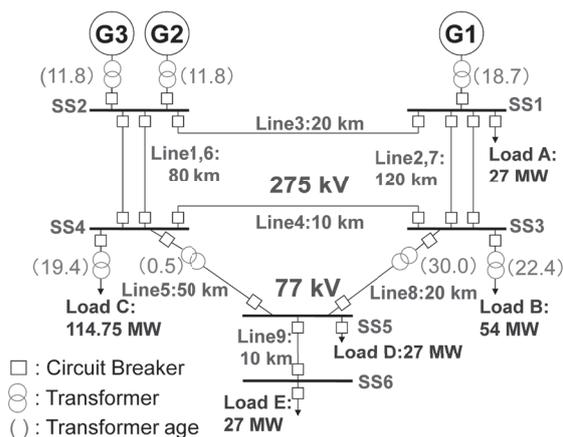


図3 275 kV / 77 kVモデル系統

部の機器に負荷が偏っていると、その機器の劣化速度は極めて早くなるため故障リスクが急増する。すなわち、送変電損失を考慮するだけでなく、機器の劣化速度を考慮して潮流分布を決定することで、信頼度の高い系統運用が可能になると考えられる。特に、変圧器はその負荷率に応じて巻線温度が変化し、図2に示すように負荷率の増加によりホットスポット温度が7°C上昇すると機器寿命が1/2になる<sup>6),7)</sup>ことから、潮流制御による機器劣化制御が長期の最適系統運用に大きく寄与すると期待できる。

本検討に使用した275 kV / 77 kVモデル系統<sup>8)</sup>を図3に示す。系統内の全ての遮断器(Circuit breaker : CB)26台および変圧器(Transformer : TR)7台の合計33台を対象として保守戦略を立案する。保守の内容としては、通常保守、オーバーホール、リプレースの3種を想定した。本検討では30年間を検討期間とし、2年間隔で3種の保守のいずれかを行う。遮断器は初期経年を15年とし、変圧器は送変電ロスを最小とするように決定した潮流分布を新規状態から15年間続けた状態を検討期間の初期状態とする。IGMSを用いて最適保守と劣化制御を行った場合について、系統運用および保守に伴い変動する送変電損失、故障リスク、遮断器と変圧器の保守費用をそれぞれコストに換算して総コストを求めた。また、劣化制御の有無および保守に関して、時間計画保全(Time Based Maintenance : TBM)を用いて立案した場合と比較する。なお、TBMにおいては、遮断器は12年毎にオーバーホール、30年目にリプレースされるとし、変圧器は40年目にリプレースされるとした。

保守手法(IGMSまたはTBM)と変圧器劣化制御の有無(IGMSまたはNone)の組合せをパラメータとした4ケースの総コストの推移を図4に示す。以下、組合せは「[保守手法]-[劣化制御有無]」にて示す。今回の条件において、保守にIGMSを用いたIGMS-NoneとIGMS-IGMSの総コストは、TBMを用いたTBM-NoneとTBM-IGMSの

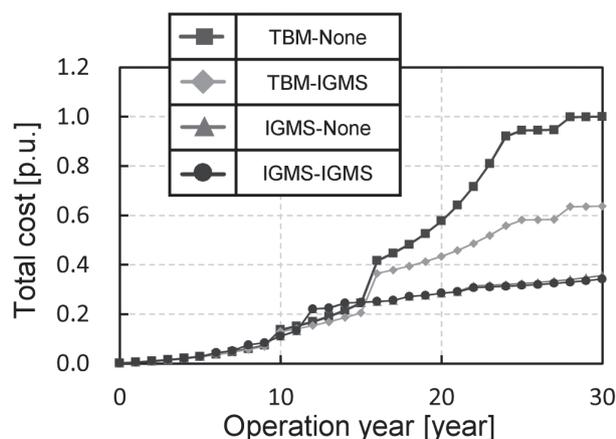


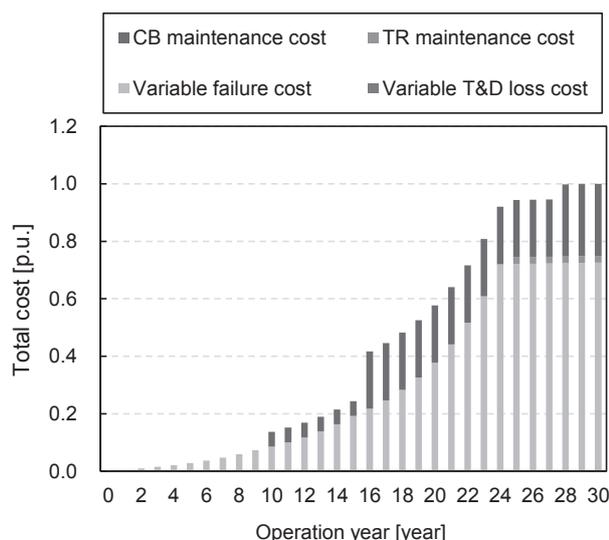
図4 送配電総コストの推移。凡例は、保守手法(IGMS or TBM)と劣化制御有無(IGMS or None)の組合せを示す。TBM-Noneにおける30年目の総コストを1 p.u.としている。総コストにおいて、送配電に最低限かかる費用は差し引いて示している。

場合よりも低く、IGMSによる保守費用と故障リスクの削減効果を表している。また、TBM-IGMSの総コストはTBM-Noneの場合よりも低く、IGMSの劣化制御による故障リスク削減効果を表している。

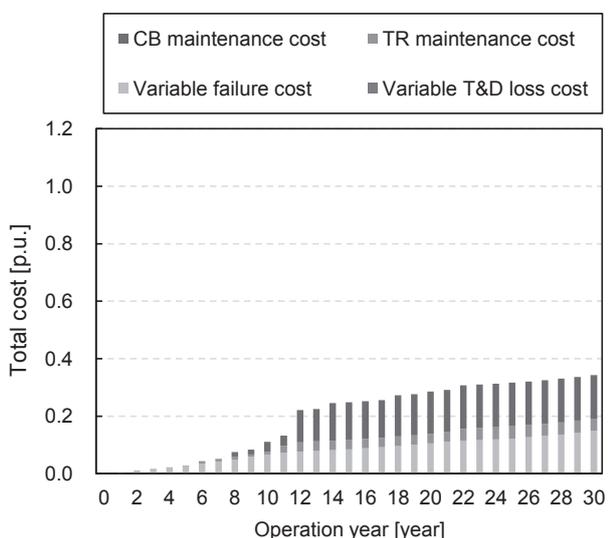
保守、劣化制御ともにIGMSを用いた場合(IGMS-IGMS)と用いなかった場合(TBM-None)の各年における総コストの内訳を図5に示す。同図より、どちらも故障リスクと保守費用が占める割合が高く、系統運用により変動する送変電ロスは1%以下と小さい。IGMSを用いた場合(図5(b))では、変圧器と遮断器の保守費用の合計と故障リスクがほぼ同等である。これは変圧器の劣化の制御と適切なタイミングで行われる保守により、保守費用と同等まで故障リスクを削減できているためである。しかし、IGMSを用いなかった場合(図5(a))では、保守費用がIGMSを用いた場合よりも多いにもかかわらず、故障リスクが大部分を占めている。これはTBMを用いて保守タイミングを一律に決めているため、各機器が系統内にて異なるリスクを有しているにもかかわらず、そのリスクに応じた適切なタイミングでの保守が行われていないためである。また、劣化制御を行わず送変電ロスを最小とするように潮流分布を決定しているため、インピーダンスが小さい経路の変圧器に負荷が偏る。その結果、変圧器の劣化速度に大きく差が現れるため、TBMで保守を行うタイミングにおいてほとんど劣化していない変圧器や過剰に劣化した変圧器が現れ、過剰な保守費用や故障リスクにつながったものと考えられる。

#### 4. まとめ

IGMSを用いて各機器の故障リスクを考慮し、適切な劣化制御を行うことにより、系統運用や保守に伴い変動する総コストを大きく削減できることを示した。機器の保守と劣化制御ともにIGMSを用いた場合、検討期間終了時の30年後には66%のコスト削減効果が得られることがわかった。このことより、IGMSの適用により各々の機器の状態や重要度に応じた適切な運用が可能であり、経済性を維持したまま信頼度の向上が可能であることを示すことができた。



(a) TBM-None (IGMSの適用無し)



(b) IGMS-IGMS (IGMSを保守および劣化制御の両方に適用)

図5 送配電総コストの内訳

## 参考文献

- 1) F. Li, W. Qiao, H. Sun, H. Wan, J. Wang, Y. Xia, Z. Xu, P. Zhang: “Smart transmission grid: vision and framework” , IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 2, pp. 168– 177 (2010).
- 2) F. Endo, M. Kanamitsu, H. Kojima, N. Hayakawa, H. Okubo: “Optimum operation and maintenance of power grid based on equipment diagnoses” , PowerTech 2007, 281 (2007).
- 3) M. Hanai, H. Kojima, N. Hayakawa, K. Shinoda, H. Okubo: “Integration of asset management and smart grid with intelligent grid management system” , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 6, pp. 2195–2202 (2013).
- 4) H. Kojima, K. Fukaya, N. Hayakawa, M. Hanai, H. Okubo: “Power flow control and maintenance strategy of transformers in transmission and distribution systems” , IEEE Transactions on Power and Energy, Vol. 135, No. 5, pp. 316–321 (2015).
- 5) H. Kojima, K. Fukaya, M. Hanai, N. Hayakawa, H. Okubo: “Planning maintenance strategy for power apparatus and T&D system with intelligent grid management system (IGMS)” , International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2014, OB6-02 (2014).
- 6) J. He, L. Cheng, Y. Sun: “Transformer real-time reliability model based on operating conditions” , Journal of Zhejiang University Science A, Vol. 8, No. 3, pp. 378–383 (2007).
- 7) Facilities Engineering Branch Denver Office: “Permissible loading of oil-immersed transformers and regulators” , Facilities Instructions Standards and Techniques, Vol. 1- 5 (2000).
- 8) R. Billinton: “Evaluation of reliability worth in an electric power system” , Reliability Engineering & System Safety, Vol. 46, pp. 15–23 (1994).