

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656193

研究課題名（和文） 電力システムと上水道システムの協調的運用制御方式

研究課題名（英文） A cooperative operation method of power and water systems

研究代表者

辻 隆男 (TSUJI TAKAO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00432873

研究成果の概要（和文）：

再生可能エネルギーの電力システムへの大量導入を実現するためには、その不確実な出力変動を適切に補償するための需給運用制御の高度化が不可欠である。そこで本研究では、不確実性の下でもシステム運用上の各種制約違反が生じないような、確率論的な経済負荷配分手法を提案した。また需要家側からの需給維持への貢献として、同じ主要インフラである上水道システムにおける電力需要制御の可能性について検討したが、その協調技術はまだ明らかにできていない。

研究成果の概要（英文）：

In order to realize the penetration of renewable energy to power systems, it is of prime importance to enhance the supply and demand control method. In this study, it is proposed that a new probabilistic method of economic load dispatch in which the various constraints for stable system operation are not violated due to the uncertain changes of renewable energy. In addition, demand side control in water system for supply and demand balance is also studied. However, the cooperation method among them has not clarified yet.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：電力システム工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電力システム，需給制御，風力発電，経済的負荷配分，デマンドレスポンス

### 1. 研究開始当初の背景

エネルギー・環境問題の解決に向けて、太陽光発電や風力発電など、再生可能エネルギーを利用した分散型電源の導入が、世界的に注目を集めている。このような電源は気象条件に応じて出力が変動するため不安定であり、大量に導入された場合は、電力システムにおける需給バランスの維持制御が困難になることが懸念されている。従来の電力システムの考え方では、在来の同期発電機群は負荷周波数制御の考え方によって出力を調整し、需給バランスの維持が実現されている。しかし太陽光発電や風力発電の大量導入により需給バランスの変動量が増加すると、在来の同期発電機群の供給力調整に対する負担が増加し、

供給力の調整が追い付かなくなる恐れがある。また、従来の電力需要の変動は、一般的には電力システム各地において、日間で同様の傾向の時間変動を示すことが主であったが、再生可能エネルギーの普及後は、地域ごとに気象条件に差異があると、これに起因して見かけの電力需要の地域間の格差が増大することも考えられる。

以上のように、不確実性の増大した需給バランスの変動に対応するためには、以下の2点の検討が重要となる。まず1つ目として、不確実性を考慮した同期発電機群の運用方式の構築である。電力システム側から需要側を見た“見かけの電力需要”の不確実性が増大してくると、その挙動を確率論的に捉え、各種

の制約を違反しないような需給運用を実施する必要が考えられる。このような確率論的な方法論を検討する必要がある。次に2つ目として、電力供給側だけでなく、電力需要側の調整により需給バランス維持に貢献する“ディマンドレスポンス”の検討である。上記のような対策を効果的に組み合わせることで、効率的な需給バランス維持の実現が期待できる。

## 2. 研究の目的

背景で示した通り、発電機運用の高度化とディマンドレスポンスの適用は、いずれも需給問題の検討に際し重要な事項である。そこで本研究では、同期発電機群の運用制御体系の高度化のために、基幹電力系統における送電線路の電力潮流が容量を超過しないように、確率論的な観点から同期発電機群の需給運用を高度化する手法を検討した。また、ディマンドレスポンスの一環として、電力と同様に基盤インフラの一つである水道需要に着目し、その送配水に必要なポンプの電力需要を制御対象とすることの有効性を検討した。

## 3. 研究の方法

一般に発電機運用に際しては、日間を通じた各発電機の出力調整は経済性を考慮して決定されており、これは“経済的負荷配分”と呼ばれている。これにより決定される日間の運用パターンに対し、数十分程度の周期で生じる需給バランスの変動に対しては、経済性の考慮は含めずに“負荷周波数制御”と呼ばれるメカニズムにより調整がなされている。本研究では、再生可能エネルギーの出力変動が負荷周波数制御が対象とする時間領域に相当する想定の下、この不確実な変動を吸収できるマージンを持たせて経済的負荷配分制御を実施することで、不確実性を考慮しながらも、極力経済性を低下させない運用手法を提案した。同手法はニュージーランドを基にしたモデルシステムを用いて、C言語によるシミュレーションで有効性を確認した。なお本手法の検討においては、再生可能エネルギーとして風力発電を想定しているが、太陽光発電でも同様の手法が適用可能である。

一方、ディマンドレスポンスとしてのポンプ需要の制御に関しては、文献調査等を主としてその有効性を検討したが、基幹電力系統を対象とする限りにおいては、単独の制御では大きな有効性が得られないものと考えられるため、前述の基幹電力系統の運用制御手法に、主たる検討の対象がシフトしている。

## 4. 研究成果

風力発電の確率的な出力変動は、電力系統内の各送電線路の電力潮流の不確実な変化

をもたらす。その確率的な挙動を把握するために、従来より“確率論的潮流計算手法”が広く用いられている。一般的には各負荷母線における電力需要変動の独立性の仮定の下、畳み込み法に基づいた解析的なアプローチが取られる場合が多いが、本研究のように風力発電出力の変動が解析対象となる場合には、ウィンドファーム間の出力変動の相関を適切に考慮する必要がある。相関を考慮した確率的潮流計算としては、Joint Normal Transform 法とモンテカルロ法を組み合わせた手法が有効となり得る。詳細は省略するが、同手法では相関を有した複数の一様乱数と、累積確率密度関数を適切に組み合わせることで、相関を有した風力発電出力の乱数列の発生が可能となる。図1は相関が1および0.6の二地点間の、風力発電出力の生成例である。

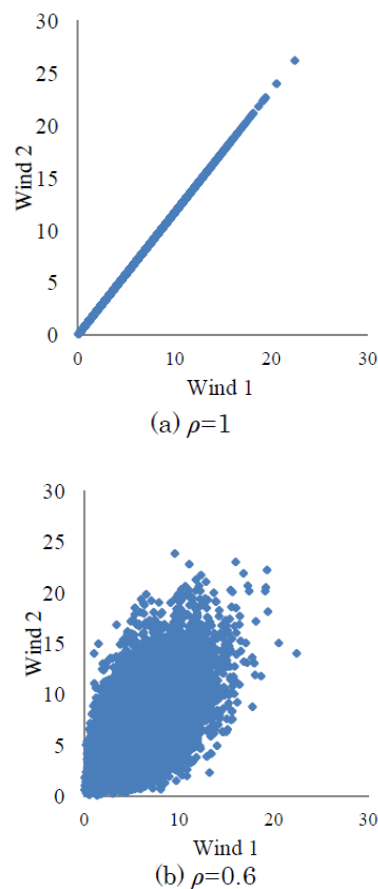


図1 相関を有する風力発電出力変動

この確率的潮流計算を実施することで、各送電線路における潮流量の確率分布が得られる。なお、モンテカルロ法に沿って風力発電出力の変動を与えると、都度電力需給バランスが変化するため、その不平衡分は次式でモデル化した負荷周波数制御により補償する。

$$\Delta G_i = UB \frac{G_i}{\sum_i G_i}$$

ただし、

**UB** : 風力発電(および電力需要変動)による需給不平衡分

$\Delta G_i$  : 発電機  $i$  の出力調整量

$G_i$  : 発電機  $i$  の出力

この確率的挙動の下でも送電線の熱容量制約が違反しないことを制約条件として、経済的負荷配分を実施する。ただし経済的負荷配分制御の定式化において直接的に確率密度関数を扱うことは容易ではないため、本研究では期待値ベースの定式化を行いながら、制約条件に確率密度関数の特徴を組み込むことを考える。具体的には図2に示すように、送電線潮流の確率密度関数と制約値を基に、電力潮流の制約違反の生じる確率を導出し、この違反確率が規制値以下に収まるように、期待値ベースで各発電機間の出力配分を調整する。

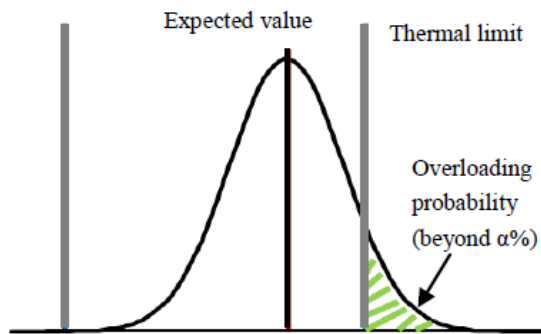


図2 電力潮流の確率密度関数

ここでN-1基準を考慮するために、各送電線を1回線ずつ除去した状態で合計N個の確率分布を生成する(送電線故障が発生した場合、当該線路が線路両端の遮断器の動作により切り離されることを想定している)。故障線路の再開路により復旧できる事故ケースでは長期的には全ての回線が健全状態となり、事故箇所に関係なく同一状態での評価となるが、ここでは再開路で復旧できない場合を想定した解析としている。全Nケースにおける制約違反確率の全てが許容値に収まるように経済負荷配分結果の修正を行う。具体的には以下の手順に従う。

[手順1] 通常の経済的負荷配分の定式化に送電線路の容量制約条件も追加し、風力発電出力を期待値とみなして経済的負荷配分結果を導出する(最適化計算を実施する)。こ

の解をベースに以降の手順を実施する。

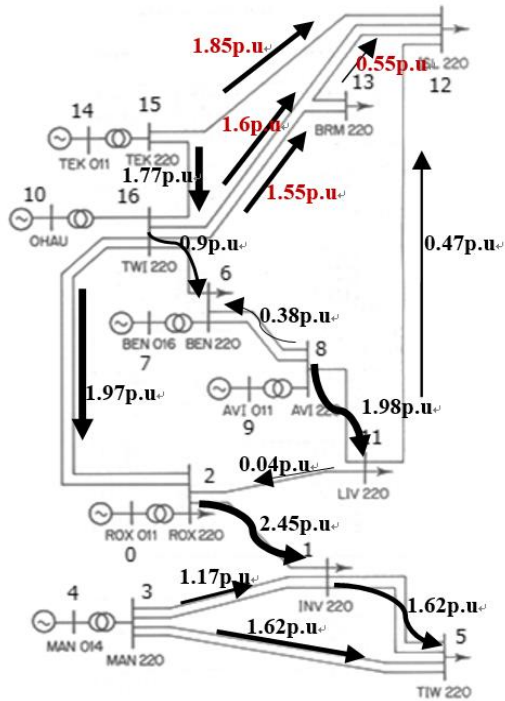
[手順2] 手順1の結果に対して、相関を考慮した風力発電出力の確率変動モデルを基に、モンテカルロ法による確率的潮流計算を実施する。その結果、各事故ケースでの各送電線路における電力潮流量の確率密度関数が求まる(N-1基準を満足するために、全Nケースを導出する)。

[手順3] 経済的負荷配分結果を期待値ベースで修正した場合でも、確率密度関数の形状に変化がないという想定の下、送電線路の上下限制約を意図的に厳しく変化させた状態で経済的負荷配分の再計算を実施する。ここで制約条件の修正量は、図3の斜線分の面積(制約違反確率)が許容値以下になることを条件に定める。なお上記の仮定に関しては、電力潮流計算における「直流法」の仮定が成立するような条件下では、一般に線形性が強く表れるため成立すると考えられる。ただし発電機上下限出力などの制約条件に突き当たるケースにおいては不連続性が現れるため、必ずしも有効に機能するとは言えず、慎重な評価が必要である。

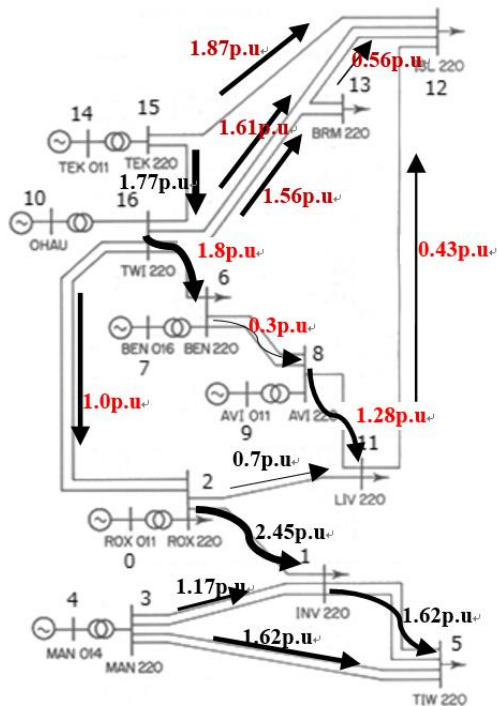
[手順4] 全Nケースに対して手順3の考慮を行うことで、制約違反確率の発生確率を許容値以下に抑制することが、N-1基準の下で達成できる。

図3に示すモデルシステムを用いて、提案手法の有効性を検討した。ここで風力発電は母線5と12に導入されている。まずはじめに、各風力発電の出力を期待値とみなして経済的負荷配分制御により各同期発電機の出力を決定すると、図3(a)に示す通り、各送電線路を流れる電力潮流が定まる。ここで、図中の数字は期待値であるが、実際には図4(a)に示すように、風力発電出力の変動に応じて電力潮流の大きさは確率的に変動することになる。ここで同図は送電線8-11を流れる電力潮流の確率密度関数を示しており、横軸が電力潮流の大きさを表している。同図には合わせて破線(電力潮流の大きさが1.50[p.u.])が示されているが、これが同送電線路の容量制約を示している。したがってこのケースでは、多くの場合は送電線の容量オーバーが生じることが分かる。一方で提案手法を適用した場合の電力潮流の様相、およびこのときの送電線8-11の電力潮流の確率密度関数を、図3(b)および図4(b)にそれぞれ示す。提案手法の適用により同期発電機の運用が変化し、同送電線の電力潮流はほぼ完全に容量制約以内に収まる事が分かる。個の運用により発電コストの総和が増加して経済性は低下するものの、その低下も限定的であることが数値計算により示されている。

上水道システムとの協調の際には、各地域における送配水のプロセスには配水池とし



(a) ベース状態

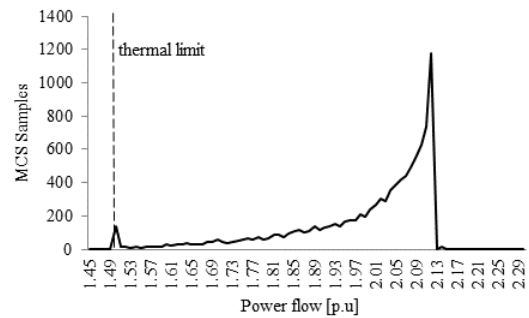


(b) 提案手法適用後

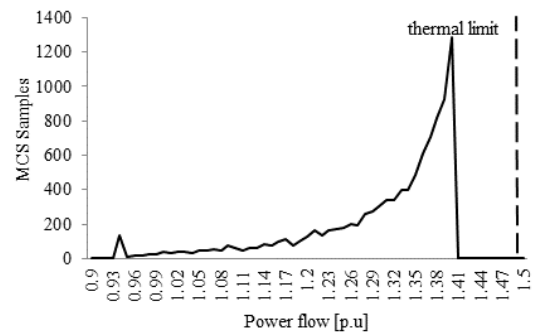
図3 システムモデルと電力潮流状態

でのバッファが存在するため、その貯水量を一時的に計画値から変動させるような運用を行うことで、ポンプに要する電力需要を調整することが可能である。その効果は本数値

計算例のように基幹電力システムを対象とした場合には限定的であると考えられるが、発電機出力の調整と同様の論理により、電力需要レベルの調整を実施できれば、送電線潮流の制約の範囲内で経済性を追求した運用が可能になると考えられる。このコンセプトに関しては、上水道システムに限定せず、需要の制御全般に通じる議論である。ただし貯水量を一時的に変化させるような上水道システムの運用に際しては、その実現に向けて確実な送配水の実施が保証される範囲で行う必要がある。現在はまだ技術的な要件を整備して、電力システムの運用と連携させるところまでは進展できていない状況にある。



(a) ベース状態



(b) 提案手法適用後

図4 送電線8-11の電力潮流の確率分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① TRAN NGUYEN, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama: "A Study on Economic Load Dispatch based on Power Flow Constraint with N-1 Criterion considering Correlation among Wind Farms", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.8, No.6 (2013) 印刷中, 査読有
- ② Mitsutaka Yoshida, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama, Takuhei Hashiguchi, Tadahiro Goda, Hidemi Kihara,



Fumitoshi Nomiya, Naoto Suzuki: "A Study on Synchronous Stability Analysis of Power System with a Large Amount of PVs", Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol.2, pp.201-207 (2012), 査読有

〔学会発表〕(計5件)

- ① TRAN NGUYEN, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama: "A Probabilistic Operation Method of Power Systems with WFs considering Voltage and Power Flow Constraints", Proc. of the International Power and Energy Conference (IPEC2012), Th43.3, 2012年12月12日～2012年12月13日, Sheraton Saigon Hotel & Towers, Ho Chi Minh City, Vietnam
- ② TRAN NGUYEN, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama: "A Study on Economic Load Dispatch with the Reactive Power Regulation of WTs considering Voltage Stability", 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PSE-12-088, 2012年08月06日～2012年08月08日, 東京大学本郷キャンパス, 日本
- ③ TRAN NGUYEN, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama: "A Study on Voltage Control considering Voltage Stability", Proc. of the International Conference on Electrical Engineering 2012 (ICEE2012), P01-1, 2012年7月8日～2012年7月12日, ANA Crown Plaza Kanazawa, Japan
- ④ TRAN NGUYEN, 辻 隆男, 大山 力: "大量の風力発電を含む電力系統における電圧制御手法の研究", 電力系統技術研究会, 2012年1月27日, 名城大学(名古屋)
- ⑤ チャン グェン, 辻 隆男, 大山 力: "風力発電出力の相関を考慮したN-1規準における経済的負荷配分手法の研究", 新エネルギー・環境・メタボリズム社会・環境システム合同研究会, 2011年11月2日, 北海道大学(札幌)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻 隆男 (TSUJI TAKAO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 00432873