

分散型電源/電力貯蔵を含む環境保全型エネルギー供給システムに関する包括的研究	
題目	制御付き確率潮流計算に関する研究
著者	中西要祐・中垣隆雄・滝沢研二・小野田弘士

1. 研究概要

分散型電源等を対象とした確率潮流計算では、風力発電や太陽光発電のように天候・気象に依存して確率的に変化する発電量をノード指定として扱い、確率的な潮流解(電圧/位相や線路潮流値など)を求める必要がある。従来、変動する指定回数分だけ NR(Newton-Raphson)法などを用いて繰り返し計算を行い、大量の潮流解を算出するモンテカルロ法により算出してきたが、計算時間が大きくなるという課題があった。これまで、モンテカルロ法に対して任意多項式カオス方式を導入することで、200 倍以上の計算速度となる確率潮流計算を提案してきた[1]。

上記確率潮流計算の適用技術の最終年度では、ガバナフリー制御、電圧無効電力制御を考慮した「制約付き確率潮流計算」の適用方式のまとめを報告する。

2. 最終年度の成果

< 2・1 > 確率潮流計算の方式

任意多項式カオス方式は、入力の変動要素(発電量/負荷量)の分布を直交多項式で表し、その基底を線形結合した繰り返し計算が不要なスペクトル表現に基づく代数方程式(応答関数)により潮流解を求めるものであり、以下のステップより構成される。

ステップ 1: 変動要素の確率分布から直交多項式を計算し、その直交多項式を用いてスペクトル表現の基底関数を求める。基底関数の数 K は $K = (N+d)! / N!d!$ (N: 確率変数の数、d: 直交多項式の最大次数) となる。

ステップ 2: 基底関数の数 K に応じた選点数分だけ NR 法などによる確定的潮流計算(選点法)を用い、直交多項式の零点に対する出力を求める。

ステップ 3: 求めた零点と出力値を用いてスペクトル表現による確率応答関数の係数 C_i を求める。

$$Y(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = \sum_{i=0}^K C_i \Phi_i(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$$

このとき、確率出力結果 $Y(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ は求めたい潮流解の物理量(線路有効電力/線路無効電力、母線電圧/位相角)に応じてそれぞれ係数 C_i が求まる。制御付きの場合も確率応答関数の形式には変更はない。

ステップ 4: 入力の変動要素の確率分布より得られる変動値を次々に選択して確率応答関数を計算する。

ステップ 5: 確率応答関数の出力結果より確率分布を計算する。

< 2・2 > 制御付き確率潮流計算の方式

任意多項式カオス方式を、制御機能を持つ母線を持つ場合に拡張した。本報告では、制御機能としてガバナフリー制御、電圧無効電力制御を取り上げる。

この制御付き確率潮流計算の計算手順では、前述のステップ 2 で、NR 法の繰り返しステップに制御パラメータを付加した確定的潮流計算を用い、ステップ 3 で、この選点された制御付き潮流解により、 $Y(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ の各変数に対応する係数 C_i に反映させる。

(1) ガバナフリー制御 (Frequency-Watt 制御)

スラック母線を用いる潮流計算では、潮流計算の系統周波数 f を一定値として、スラック母線の有効/無効電力は後処理で求められる。一方、ガバナフリー制御では f を変数として従属変数の役割を持たせ、スラック母線も変動ノードとして、<2.1>に示した計算手順ステップ 2 での潮流計算をガバナフリー制御による潮流計算に置き換える(動的潮流計算)。

潮流計算式は以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} & K \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta} & 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta f \end{bmatrix}$$

K: ガバナ係数

ΔP : 有効電力差分

ΔQ : PQ 指定母線の無効電力差分

ΔP_n : 発電機母線の有効電力差分

$\Delta \delta$: 母線の電圧位相角差分

ΔV : 母線の電圧差分

Δf : 系統周波数差分

動的潮流計算の場合もステップ 3 以降の変更はない。なお、確率出力結果 $Y(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ を系統周波数とすることで、周波数の変動確率分布を求めることができる。モンテカルロ計算法と比較した結果、多項式最大次

元＝4 では精度的に概ね一致した分布が得られた。

(2) 電圧無効電力制御 (Volt-Var 制御)

電圧無効電力制御は、変動電源や変動負荷の導入により、参照母線として選択したパイロット母線の電圧逸脱に注目し、特定の母線に PCS (Power Conditioning System) を設置して無効電力を動的に生成・吸収することで抑制する制御方法である。電圧無効電力制御付き確率潮流計算についても、<2.1>に示した計算手順上記ステップ 2 において、制御変数 L を組み込んだ潮流計算式を用いることで計算する[2]。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} + L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

$L = \text{diag}(1, 1, \dots, L^*, 1, \dots, 1)$ L^* : スカラー値
制御母線における無効電力と L との関係は、

$$\Delta Q = L \cdot \Delta V$$

ΔV : 母線電圧差分

ΔQ : 母線に注入する無効電力差分

なお、潮流計算式への L の導入により、繰り返し計算を収束させることができないケースがあるという問題が起こるため、 L の導入と等価となる無効電力を制御母線に注入する方法を用いた。このとき、ステップ 2 は、次の 2 つのステップよりなる。

ステップ 2.1:

PCS 母線を PV 指定として確定的潮流計算を実施 (P と Q の目標値は重負荷時から選択)、PCS 母線の無効電力プロファイル Q を後処理で求める

ステップ 2.2:

この PCS 母線を PQ 指定に変更し、PCS 母線の電圧目標値を定格値として、また、PCS 母線にステップ 2.1 で求めた無効電力を加算して直交多項式の零点に関して確定的潮流計算を実行する。このとき無効電力制御パラメータ L を計算する。

$$L = \frac{Q - Q_{\text{ref}}}{V - V_{\text{ref}}}$$

Q_{ref} : PCS 母線の無効電力 Q 参照値

V_{ref} : PCS 母線の電圧 V 参照値

なお、ステップ 5 では、電圧逸脱が起きないように L の値を変更していくことで、電圧逸脱が発生しない L 値を求める。

3. まとめ

- ・ガバナフリー制御付き確率潮流計算、無効電力制御付き確率潮流計算ともに、モンテカルロ法計算と比較して精度よくかつ高速に確率潮流計算を実行できる。
- ・確率応答関数の形式は変更されない。確率分布の直交多項式よりなる基底の線形結合より構成される基底も変更されない。従ってガバナフリー制御の効果、無効電力制御の効果は、確率応答関数の係数 C_i の中にすべて組み込まれる。送電線遮断においては、送電網の変化も係数 C_i の中に組み込まれていた[1][3]。このように係数 C_i は、出力変数 Y の種別だけでなく、ネットワーク構造の変化及び制御効果も引き受ける役目を持っている。このため確率応答関数の基底の数を適切に与える事により精度が維持する事が可能となる。
- ・母線は PQ 指定であれば、変動を注入する母線でも P および Q は独立変数としての役割を持つ。なお、スラック母線を用いる場合は、P、Q は従属変数となる。発電機母線、制御母線は PV 指定であり P と V が独立変数、Q と δ が従属変数となり、ガバナフリー制御では系統周波数 f が従属変数となる。独立変数と従属変数の変換は、確率応答関数の係数 C_i が担っていると言える。

参考文献

- [1] Kazuaki Iwamura, Tsubasa Kanezaki, Motoshi Maekawa, Daiki Sakamoto, Sho Minakuchi, Yosuke Nakanishi, “Stochastic Power Flow Simulation Platform based on Extendable Arbitrary Polynomial Chaos”, 2024 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS) 2024, 24th – 26th June 2024.
- [2] T. Kawashima, Y. Arie, Y. Nakanishi, R. Suzuki, “Method for Determining Optimal PCS Reactive Power Control Parameters, 2024, IEEE Power & Energy Society General Meeting
- [3] Daiki Sakamoto, Tsubasa Kanezaki, Kazuaki Iwamura, Yosuke Nakanishi, Noboru Hattori, Mamoru Kasuga, “Probabilistic Power Flow for Renewable Energies with Line Outage Distribution Factor”, 2024 IEEE PES GTD International Conference and Exposition, Ixtapa, Mexico, Nov. 2024.