

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05956

研究課題名(和文) 電力系統構造変化とディペンダビリティを考慮した分散並列型電圧・無効電力制御の研究

研究課題名(英文) Parallel and Distributed Voltage and Reactive Power Control Considering Structure Change of Power Systems and Dependability

研究代表者

福山 良和 (Fukuyama, Yoshikazu)

明治大学・総合数理学部・専任教授

研究者番号：10710022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギー大量導入等を考慮し、大規模システムを対象とした短周期の電圧無効電力制御(VQC)の実現には、並列分散処理の導入が必要である。また、電力システムの社会インフラ性を考慮し、計算や通信負荷の一時的増大等によりプロセスから処理結果が一時的に得られない場合も、制御が継続可能なディペンダブルな並列分散処理の実現を目指し、複数集団型Differential Evolutionary Particle Swarm Optimizationというメタヒューリスティック手法を新たに開発し、これを用いて新電圧無効電力制御方式を開発した。提案法の有効性を30母線から9241母線システムを利用し確認した。

研究成果の概要(英文)：Considering large penetration of renewable energies and deregulation of power systems, short-term voltage and reactive power control (VQC) for larger power systems is required, and parallel and distributed computing should be introduced. Moreover, since power system is one of social infrastructures, dependable parallel and distributed computing is required, with which VQC can keep even if several computing results cannot be returned from distributed processes because of temporary computing and communication heavy loads. This research developed novel meta-heuristic method called multi-swarm differential evolutionary particle swarm optimization and developed a new dependable VQC method. Effectiveness of the proposed method is verified with simulations with 30 to 9241 bus systems.

研究分野：システム工学

キーワード：電力系統 電圧無効電力制御 並列分散処理 ディペンダビリティ

1. 研究開始当初の背景

我が国は、2018～2020年を目途に発電電分離に向けて電力改革を進めようとしている。発電電が分離された場合、送電会社は、現在より、より広範囲の送電系統電圧を監視・制御する必要がある。つまり、大規模系統に対するVQCが必要となる。また、東日本大震災後の電力会社の供給予備力は、従来の目標である8～10%を大きく下回っている。例えば平成26年8月の供給予備力は、電力系統利用協議会の発表によると、特に関西電力や九州電力の予備力が小さく、周辺の電力会社からの融通を前提にした系統運用が必要となっている。原子力発電を再稼働することが難しい現在、この状況を数年で改善することは難しく、発電電分離に向けて、さらに広範囲での電圧監視・制御の必要性が増していると言える。また、平成24年7月から始まった再生可能エネルギー発電の全量買取制度により、特に太陽光発電は、平成25年度導入容量が5月時点で原発約1基分となっており導入が進んでいることが報告されている。太陽光発電は日射量により発電量が変動することが知られており、この出力が瞬時に変動することを前提に考えると、電圧監視・制御間隔は従来の15分程度よりも大幅に短くすることが必須となる。つまり、上述の背景を考慮すると、従来より、より広範囲の大規模系統に対し、数分程度の制御間隔でVQCを実行する必要がある事を意味している。

VQCは、例えば電力系統の生来の非線形性を示す潮流方程式、送電線の潮流の上限制約、および各母線電圧の上下限制約を満たしながら、電力送電ロス(連続量)や変圧器のタップ位置、調相設備の導入台数(離散量)を決定する混合整数非線形最適化問題として定式化できる。本問題は、従来の数理計画法で解くことは困難であり、近年、各種メタヒューリスティック手法の適用が検討されてきた。メタヒューリスティック最適化手法(以下、MH手法)とは、単純なルールやヒューリスティクス(発見的な手法)を反復的に用いることによって最適化問題において短時間に高精度な近似解を与える手法の総称である。複数解を利用する多点探索型MH手法は、(a)手法の構造および問題特有の構造を利用して効率的な分散並列化が検討できる。(b)複数の解のうち、分散処理による解が一時的にいくつか修正されなくとも、許容できる解を生成できる可能性がある。従来、VQCに対し、各種MH手法の適用が検討されている。VQCに対し分散並列処理手法による高速化のみの検討はされているが、(a)に対し大規模系統での検討はまだ行われていない。また、電力系統は社会インフラであり、制御を中断することが許されない。つまり、分散並列処理で、一時的に計算や通信負荷の増大により一定時間内に計算結果が返らなかったり、何等かの原因により故障するPCの存在を考慮して制御を継続

できる、いわゆるディペンダブルな並列分散処理が必要である。従来のフォルトトレラント技術は2重3重のバックアップにより、故障時に処理が止まる可能性を極力下げることが目的としており、本研究のように、処理が返ってこないことを前提としてはいない。近年、一般的なPCでも、例えば4CPUを搭載するようなマルチコア型の機種が出てきており、LAN環境によるPCクラスタ接続も考慮すると、分散並列処理による高速計算が一般のPCで実現できる環境が整っている。また、PC用のグラフィック表示用の専用プロセッサを並列処理プロセッサとして利用する安価なGPGPUを利用する環境も整ってきている。

2. 研究の目的

大規模送電系統に対して、数分程度の制御間隔で電圧無効電力制御を実施でき、分散処理の遅延や故障に強く信頼性が高いディペンダブルな分散並列処理によるVQC方式を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 近年、様々なメタヒューリスティック最適化手法が開発されてきているため、電圧無効電力制御の分散並列処理に最適なメタヒューリスティック最適化手法を明確化し、これを用いたVQC方式を開発する。

(2) (1)で開発したVQC方式に対し分散並列処理方式を開発する。この際、PCの計算や通信遅延、故障を考慮したディペンダブルな分散並列方式を開発し、制御を継続できる信頼性の高いVQC方式を開発する。

(3) 上記開発手法を実際の一般的なPC環境で実装し、大規模系統の送電系統に対して、ディペンダブルなVQCが実現可能であることを実証する。

4. 研究成果

(1) VQCの分散並列処理に最適なMH手法を用いたVQC方式の開発

多点探索型のMH手法に対しては、複数集団を利用する方法の効率性が指摘されており、多点探索型の最新MH手法の1つであるDifferential Evolutionary Particle Swarm Optimization(以下、DEEPSO)を複数集団化した新しいMH手法であるMulti-swarm DEEPSO(以下、MS-DEEPSO)を提案した(図1参

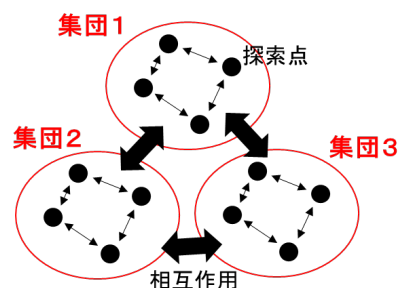


図1 MS-DEEPSOの概念図

照)。通常の DEEPSO は 1 つの集団の中で、多点探索を行うが、MS-DEEPSO は、複数の集団を利用し、それぞれの集団で別な探索を実行し、探索の途中で相互作用を行う。MS-DEEPSO においては、全ての集団の中で最も良い探索点を *abest* とし、*abest* を利用した新しい解の更新式を考案した。オリジナルの DEEPSO の更新式は以下のようになっている。

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (i = 1, \dots, N_a, j = 1, \dots, N) \quad (1)$$

$$v_{ij}^{k+1} = w_{ij}^{k+1} v_{ij}^k + C1_{ij}^{k+1} (b_j^r - x_{ij}^k) + P[C2_{ij}^{k+1} (b_{G_j}^r - x_{ij}^k)] \quad (i = 1, \dots, N_a, j = 1, \dots, N) \quad (2)$$

ここで、 x_{ij}^k : エージェント i の反復 k 回目の決定変数 j の値、 v_{ij}^k : エージェント i の反復 k 回目の決定変数 j の修正量、 N_a : エージェント数、 N : 決定変数数、 b_j^r : エージェント i の最良値 (*pbest*) の履歴からランダムに選んだ反復 r 回目の最良値の決定変数値 j の値、 $b_{G_j}^r$: 全エージェントの中で最も目的関数値が良かった (*gbest*) に対する決定変数値 j の値 ($b_{G_j}^r$ はこれに突然変異を与えた値) に対し、新しく提案する更新式は以下のようになる。

$$x_{mij}^{k+1} = x_{mij}^k + v_{mij}^{k+1} \quad (m = 2, \dots, N_g) \quad (3)$$

$$v_{mij}^{k+1} = w_{mij}^{k+1} v_{mij}^k + C1_{mij}^{k+1} (b_{mj}^r - x_{mij}^k) + C2_{mij}^{k+1} (Sb_{mj}^k - x_{mij}^k) + P[C3_{mij}^{k+1} (abest_j^k - x_{mij}^k)] \quad (4)$$

ここで、 N_g : 集団の数、 Sb_{mj}^k : 反復回数 k 時点でのサブ集団 m で最も目的関数値が良い決定変数 j の値、 $C3_{mij}^{k+1}$: エージェント i の決定変数 j の反復 k 回目の各項の重み係数、 $abest_j^k$: 反復回数 k 時点での探索母集団全体で最も目的関数値が良い決定変数値 j の値

つまり、提案する MS-DEEPSO は、オリジナルの DEEPSO を集団型に変更し、さらに、全ての集団の中で最も良い解である *abest* へ引かれる項を新たに追加した。

また、MS-DEEPSO を用いた VQC 方式を提案した。例として、表 1 に電力系統分野の典型的なベンチマーク系統である IEEE118 母線系統に対するオリジナルの DEEPSO を用いた手法と、集団数を変化させた MS-DEEPSO を用いた手法の比較をあげる。表では、定常時の VQC の目的関数として設定した全系統ロス値の平均値と標準偏差をあげている。全系統ロス値が小さいほど、標準偏差が小さいほど良い手法となる。表 1 をみてわかる通り、集団数が 2 の時に、最も良い結果が得られることが明確になった。

(2) ディペンダブルな並列分散並列型 VQC 方式の開発

スーパーコンピュータ等の特殊な環境ではなく、一般的な PC において並列分散処理を実現するには、個々のプロセスの計算を

表 1 オリジナル DEEPSO と集団数を変えた MS-DEEPSO による VQC の比較 (目的関数の平均値と標準偏差)

手法	集団数	平均値	標準偏差
オリジナル DEEPSO	1	1.0000	1.0000
MS-DEEPSO	2	0.93998	0.60925
	4	0.94144	0.61954
	8	0.96637	0.90746
	16	0.98043	0.84062

注) 数値はオリジナル DEEPSO の平均値及び標準偏差を 1 とした時の比率

実行する際に、時々相互作用があるような粗粒度 (coarse-grained) な並列分散処理が有効となる。この考えに基づき、(1) で開発した MS-DEEPSO に対し、集団毎の計算をプロセスに割り当て、相互作用として全ての集団の中で最も良い解である *abest* のみを通信によりブロードキャストする粗粒度な並列分散処理を実現した。また、計算や通信負荷の一次的な高負荷化によりプロセスつまり集団の計算結果が返ってこない場合、この集団の解が変更なく、他の集団のみの解から *abest* を計算することとした。

(2) ディペンダブルな並列分散型 VQC 方式の検証

図 2 に IEEE30, 57, 118 母線系統に対し、1 集団のみを用いるオリジナルの DEEPSO、提案法の MS-DEEPSO を用いた場合のプロセス数の変更による 100 回試行した計算時間の平均値の推移を示す。図 2 では、集団を別プロセスで並列化している。IEEE30, 57, 118 母線系統すべてで、プロセス数を 1 から 2 に変更した際は、約 2 倍の高速化、4, 8 に変更した際は、約 3 倍の高速化が出来ている。また、ディペンダビリティ性を確認するために、事故確率を 10~90% まで変更した際の平均目的関数の推移を確認した。図 3 に、IEEE118 母線系統に対し、MS-DEEPSO を用いた提案法の集団数を変更した際の目的関数値の推移を示す。図 4 に、IEEE118 母線系統に対し

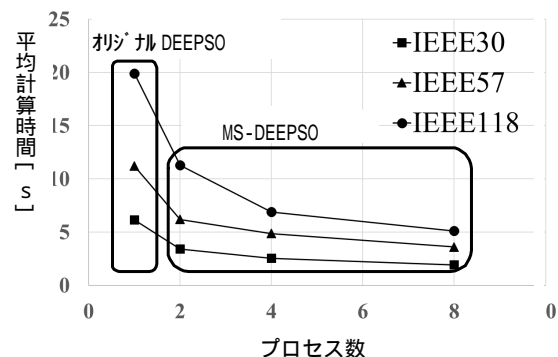


図 2 IEEE30, 57, 118 母線系統に対し、1 集団のみを用いるオリジナルの DEEPSO、提案法の MS-DEEPSO を用いた場合のプロセス数の変更による 100 回試行した計算時間の平均値の推移

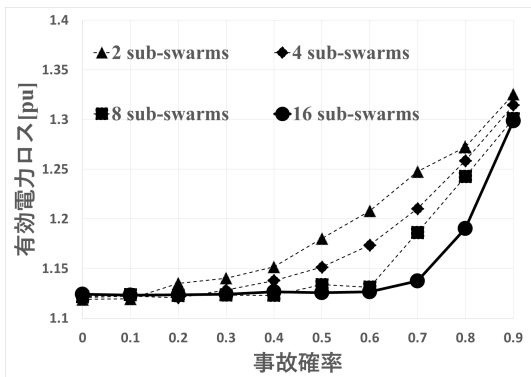


図3 IEEE118 母線系統に対し、事故確率を変化させた際の様々な集団数を用いた MS-DEEPSO による提案法の目的関数値推移

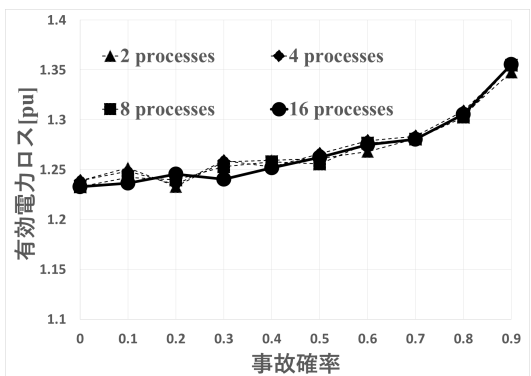


図4 IEEE118 母線系統に対し、事故確率を変化させた際の様々なプロセス数を用いたオリジナル DEEPSO の目的関数値推移

オリジナル DEEPSO を用いた従来法のプロセス数を変更し、適用した際の目的関数値の推移を示す。図3, 4から、提案法が、従来法よりも高いディペンダビリティ性があることが確認できる。また、提案法は集団数を増やすと高い故障確率でもディペンダブル性を保持できるという新たな知見を確認した。例えば、故障が発生してロス値が改悪しても10%の改悪まで許容するとすれば、16 集団を利用すれば事故確率70%まで、2 集団でも40%までは許容されることが分かった。

多点探索型 MH 手法の VQC への適用を並列分散処理化する場合、並列潮流計算(以下、PLF)をさらに同時に複数解くということが必要となる。大多数の同じ処理を同時に解く並列分散処理は、GPGPU が得意とする分野であり、MS-DEEPSO の PLF を同時に処理する部分を GPGPU により実現した。例として200 の PLF を同時に並列処理した場合の各系統に対する高速化割合を表2に示す。高速化割合は、CPU を用いた並列処理に対する高速化割合を示している。GPGPU は、NVIDIA 社製の K20c を用いた。CPU を用いた並列処理により高速化は実現できるが、さらに GPGPU を用いることにより、どの程度のさらなる高速化が可能であるかを示している。1 行目の数値は、それぞれ、118 母線、300 母線、1354 母線、2869

表2 200 の PLF を同時に並列処理した場合の各系統に対する高速化割合

処理	118	300	1354	2869	9241	平均
処理 1	1.99	2.24	1.63	1.70	1.56	2.02
処理 2	3.36	3.45	1.21	0.83	0.57	3.36
処理 3	4.28	4.03	2.64	2.45	2.17	4.17
処理 4	4.76	8.23	4.73	5.33	4.30	5.37
処理 5	3.35	5.35	4.15	4.49	3.37	3.88
処理 6	0.84	1.53	1.69	1.75	1.85	1.40
処理 7	2.05	2.16	2.55	2.47	2.33	2.10
合計	0.58	1.27	2.08	2.32	2.28	1.18

処理 1: アドミタンス行列計算, 処理 2: 母線電圧計算, 処理 3: パワーフロー計算, 処理 4: 電圧修正, 処理 5: 収束判定, 処理 6: 潮流計算, 処理 7: 潮流計算
注)高速化割合は、CPU を用いた並列処理に対する高速化割合を示す。

母線、9241 母線系統を意味している。GPGPU を用いることにより、9241 母線系統という超大規模系統に対し、さらに 2.28 倍の高速化が可能であることが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Hotaka Yoshida, Yoshikazu Fukuyama, "Parallel Multi-population Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization for Voltage and Reactive Power Control", Electrical Engineering in Japan, Vol.24, Issue3, pp.31-40, 2018 (査読あり)

吉田武尊, 福山良和:「エネルギープラントのオンライン最適運用計画に対するディペンダブルな並列 DEEPSO による方式の提案」電気学会論文誌 B, 138 巻 2 号, pp.116-123, 2018 (査読あり)

岩田壮平, 福山良和:「電圧無効電力制御に対する並列 DEEPSO によるディペンダビリティ評価」電気学会論文誌 B, 137 巻, 1 号, pp.52-58, 2016 (査読あり)

福山良和:「並列 PSO による電圧無効電力制御に対するディペンダビリティの評価」電気学会論文誌 B, 136 巻, 1 号, pp.11-17, 2016 (査読あり)

〔学会発表〕(計16件)

吉田武尊, 福山良和:「電圧・無効電力制御に対するディペンダブルな複数集団を用いた並列 DEEPSO の適用」電気学会全国大会 No.6-223, 福岡, 2018 年 3 月 (査読なし)

東大智, 吉田武尊, 福山良和:「電圧無効電力制御に対する Canonical Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization の適用」電気学会全国大会 No.6-224, 福岡, 2018 年 3 月 (査読なし)

Hotaka Yoshida and Yoshikazu Fukuyama, "Dependable Parallel Multi-population

Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization for Voltage and Reactive Power Control in Electric Power Systems", Proc. of IEEE International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA2017), Hiroshima, Nov. 2017 (査読あり)

Hotaka Yoshida and Yoshikazu Fukuyama, "Parallel Multi-population Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization for Voltage and Reactive Power Control in Electric Power Systems", Proc. of SICE Annual Conference, Kanazawa, Sep. 2017 (査読あり)

吉田武尊, 福山良和:「電圧無効電力制御に対する複数集団を用いた並列 DEEPSO の適用」電気学会電力・エネルギー部門大会論文 N.34, 東京, 2017 年 9 月 (査読なし)

Araujo Igor, Tadaiesky Vincent, Santana Adamo, 福山良和:「GPU Performance Evaluation for Concurrent Power Flow Calculations」電気学会全国大会 6-087, 富山, 2017 年 3 月 (査読なし)

吉田武尊, 岩田壮平, 福山良和:「電圧無効電力制御に対するディペンダブル並列 DEEPSO のパラメータ感度解析」電気学会全国大会 6-241, 富山, 2017 年 3 月 (査読なし)

Sohei Iwata and Yoshikazu Fukuyama, "Verification of Dependability on Parallel Differential Evolution Based Voltage and Reactive Power Control" Proc. of IFAC Control of Transmission and Distribution Smart Grids (CTDSG2016), Prague, Oct. 2016 (査読あり)

Sohei Iwata and Yoshikazu Fukuyama, "Dependability Verification of Parallel Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization Based Voltage and Reactive Power Control", Proc. of IEEE PowerCON2016, Wollongong, Sep. 2016 (査読あり)

岩田壮平, 福山良和:「電圧無効電力制御に対する並列 DEEPSO によるディペンダビリティ評価」平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文 No.22, 福岡, 2016 年 9 月 (査読なし)

Araujo Igor, Tadaiesky Vincent, Santana Adamo, 福山良和:「Comparative analysis of GPU Approaches for Power Flow Calculation in CUDA」平成 28 年電気学会全国大会 No.6-087, 仙台, 2016 年 3 月 (査読なし)

岩田壮平, 福山良和:「並列 DE による電圧無効電力制御に対するディペンダビリティの評価」平成 28 年電気学会全国大会

No.6-241, 仙台, 2016 年 3 月 (査読なし)
Yoshikazu Fukuyama, "Verification of Dependability on Parallel Particle Swarm Optimization Based Voltage and Reactive Power Control", Proc. of IFAC Symposium on Control of Power and Energy System (CPES2015), New Dehli, Dec. 2015 (査読あり)

Yoshikazu Fukuyama, "Parallel Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Investigating Dependability", Proc. of IEEE Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP2015), Porto, Sep. 2015 (査読あり)

福山良和:「並列 PSO による電圧無効電力制御に対するディペンダビリティの評価」電気学会 電力・エネルギー部門大会 論文 -7, 名古屋, 2015 年 8 月 (査読なし)

Yoshikazu Fukuyama, "Parallel Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Verifying Dependability", Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2015), Sendai, May 2015 (査読あり)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福山 良和 (FUKUYAMA, Yoshikazu)
明治大学 総合数理学部・教授
研究者番号: 10710022

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

アダモ サンタナ (Adamo Santana)
Federal University of Para・準教授

松井 哲郎 (MATSUI Tetsuro)
富士電機株式会社・部長

飯坂 達也 (IIZAKA Tatsuya)
富士電機株式会社・GM