

称号及び氏名 博士（工学） 川本 直輝

学位授与の日付 令和3年3月31日

論文名 「交流・多端子直流システムの電圧および過渡安定性  
に関する研究」

論文審査委員 主査 石亀 篤司

副査 小西 啓治

副査 森澤 和子

## 論文要旨

近年、地球温暖化対策や脱炭素を目的として、風力発電および太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギーの導入が進んでいる。世界全体における発電量の5.3%を風力発電、2.7%を太陽光発電が占めている。国際再生可能エネルギー機関の報告書によると、世界全体において2018年時点で陸上風力発電において542 GW、洋上風力発電において23 GWが導入済みであり、2050年時点で陸上風力発電において5044 GW、洋上風力発電において1000 GWが導入予定である。

洋上風力発電は、海底に敷設された送電線により、海上の風力発電所から陸地側変電所に送電する。海底の送電線には交流送電もしくは直流送電を適用可能であり、送電線の亘長が長くなる場合には表皮効果のない直流送電の方が低コストにて送電可能となる。直流送電を適用する場合には、電力変換器を用いて交流電力を直流電力に、直流電力を交流電力に変換する必要がある。電力変換器には、他励式変換器（Line-Commutated Converter：以下、LCC）および自励式変換器（Voltage-Source Converter：以下、VSC）という2種類の変換器が存在している。LCCはサイリスタなど自己消弧能力をもたない素子を用いて、VSCはInsulated Gate Bipolar Transistor（以下、IGBT）などの自己消弧素子を用いる。

現在、海底の送電線に用いられる高圧直流送電（High-Voltage Direct Current：以下、HVDC）は、基本的に洋上風力発電所と陸地側変電所の2箇所を接続するpoint-to-point接続に適用されている。しかしながら、HVDCは、直流システム内に3箇所以上の端子および2つ以上の送電線を持つ多端子直流送電（Multi-Terminal Direct Current：以下、MTDC）を適用される事例もあり、Nanao 3端子およびZhoushan 5端子DCシステムが既に建設され運用が開始されている。さらに、North Sea Wind Power Hub Programmeは、欧州の北海にMTDCシステムを適用した大規模洋上風力発電所を建設予定である。これらのMTDC

システムは VSC により、Alternative Current (以下、AC) システムに接続される。本論文では、AC システムに MTDC システムが導入されたシステム全体を AC/MTDC システムと呼称する。

MTDC システムと接続される既存 AC システムは、大規模停電のリスクを有する。具体的な事例として、2003 年のアメリカ北東部大停電や 2006 年のヨーロッパ広域停電などが挙げられる。これらの大規模停電は、特定の送電線に発生した故障の影響がシステム全体に波及したことで発生したとされている。電力システムは、このような停電を防ぐために設備的な冗長性を確保しており、N-1 故障と呼ばれる 1 箇所の設備に対して故障が発生した場合には、原則として供給支障を生じさせないことが求められる。このように冗長性を有したシステムにおいても、事故波及による大規模停電リスクは存在する。このため、大規模停電の防止を目的とした設備運用が必要である。

電力システムの設備運用において、システムの電圧を適切な値に維持する電圧無効電力制御 (Voltage and reactive power Control : 以下、VQC) がある。VQC には、各変電所において局所情報のみを用いて制御する個別方式、システム全体の情報を用いて制御する中央方式の 2 つに大別される。VQC は、同期発電機の自動電圧調整器 (Automatic Voltage Regulator : 以下、AVR)、変電所の負荷時タップ切換器 (On-Load Tap Changer : 以下、OLTC)、および変電所の調相設備 (電力用コンデンサおよび分路リアクトルから構成される) などの指令値および投入量における適切な運用により実現される。

電力システムの安定性解析として相差角安定性、周波数安定性および電圧安定性に関する解析が存在し、これらの安定性は、短時間および長時間のスケールを持つ。ここで、AC/MTDC システムおよび既存 AC システムにおける課題に関連した安定性について述べる。AC/MTDC システムにおける課題として、MTDC システムの導入が既存 AC システムに対して与える影響の解析が挙げられる。この課題には、短時間の安定性が関連する。これは、MTDC システムの導入に必要な VSC のダイナミクスが、同期発電機のダイナミクスに比べて非常に速いためである。次に既存 AC システムにおける課題として、大規模停電の防止が挙げられる。この課題には、長時間電圧安定性が関連する。これは、前述のアメリカ北東部大停電が、オハイオ北部の電力会社における急激な電圧低下の影響がシステム全体に波及したことに端を発したためである。これら 2 つの課題に関連した安定性として、本論文では、過渡安定性ならびに短時間および長時間電圧安定性に着目する。以下に、これらの安定性について述べる。

電圧安定性は、送電線の 1 回線開放もしくは 2 回線開放、同期発電機の急停止、ならびに、負荷の急激な増加などの故障が発生した場合に、システム内の母線電圧を異常に低下もしくは上昇させることなく維持する能力を意味する。短時間電圧安定性は、誘導モーターおよび HVDC における電力変換器のように高速に変化する負荷の動特性に関係する。また、長時間電圧安定性とは緩やかな負荷増加、変圧器のタップ操作に起因する電圧低下、および同期発電機の過励磁制限制御 (Over Excitation Limiter : 以下、OEL) 動作による電圧低下などに関係する。なお、本論文では、長時間電圧安定性を単に電圧安定性と呼称する。

過渡安定性は、同期化力に関わる安定性であり、大規模の外乱 (地絡など) に対して定義され、同期発電機の相差角が大きく変動する場合において議論され、相差角に関する動揺の第一波における安定性として重要とされている。

本論文では、既存 AC システムおよび洋上風力発電の導入を目的とした AC/MTDC システムにおける前述の電圧および過渡安定性に関する未解決課題に取り組む。既存 AC システムにおける課題として電圧安定性に関連した大規模停電がある。この原因として同期発電機の無効電力出力増加に伴う OEL 動作に起因した電圧の急激な低下が指摘されている。このため、既存 AC システムにおける課題として、大規模停電の原因となりうる OEL 動作の防止に着目する。AC/MTDC システムの課題として、系統慣性の低下が懸念される。電力システムには、故障などの偶発的な事象発生後の数秒における周波数低下の度合いを左右する、いわゆる系統慣性が存在する。この系統慣性は、火力発電機など同期発電機の回転質量により基

本的に決定され、電力変換器によりシステムに接続される非同期的な再生可能エネルギーによる発電所は寄与しない。再生可能エネルギーに由来する電力供給量の増加により、既存の同期発電機による供給量が削減されることで、システムにおける系統慣性の低下が懸念されている。前述の通り、系統慣性は、数秒における周波数に影響を与えるため、洋上風力発電の導入を目的とした AC/MTDC システムにおいて数秒間の安定性について解析する必要があると想定される。このため、この AC/MTDC システムにおける課題として、数秒間の安定性である過渡安定性および短時間電圧安定性を解析する。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の研究背景として洋上風力発電の導入を目的とした AC/MTDC システムおよび既存 AC システムについて述べ、各システムにおける安定性に関わる課題と本論文の内容を述べた。

第 2 章では、故障時の既存 AC システムにおける OEL 動作防止を目的とした VQC を検討した。VQC における最適化計算にはメタヒューリスティクス的一种である粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization : 以下, PSO) を適用した。OEL 動作は同期発電機の無効電力出力が制約条件を逸脱した際に発生するため、故障時のシステムに対して通常運用時の制約を課した VQC を実行する。このため、PSO における運用に関する制約条件を効率的に満たすために、故障後のシステムの電圧安定性維持に大きく貢献する制御機器を優先的に活用する手法を提案した。提案手法では、L-index と呼ばれる電圧安定性指標に対する改善度の大きな制御機器を選択し、PSO の解探索に適用した。結果として、100 回試行の検証において制約条件を満たす割合および計算時間の両側面における向上を確認した。

第 3 章では、MTDC システムの導入による既存 AC システムにおける過渡安定性への影響について調べた。本論文では、AC/MTDC システムの過渡安定性の評価のために、漸近安定な平衡点に対する安定領域を可視化すると共に、複合型リアプノフ関数によりその十分条件を導出した。複合型リアプノフ関数は、AC システムにおける既存のリアプノフ関数と筆者が新たに all-to-all coupling の 3 端子 DC システムにおいて構築したリアプノフ関数を基にして構築される。安定領域は AC/MTDC システムの動特性を示す微分代数方程式のシミュレーションにより可視化される。そして、複合型リアプノフ関数により導出される安定領域の十分条件に対する MTDC システムの影響について調べた。

第 4 章では、AC/MTDC システムの VSC 制御方式における直流電圧に関するドループ制御および交流電圧制御が過渡安定性および短時間電圧安定性に対して及ぼす影響について調べた。本論文では、過渡安定性は  $N-1$  故障およびルート断 (ノード間に存在する全ての送電線が開放される故障) により評価し、短時間電圧安定性はステップ型の有効電力および無効電力負荷増加により評価した。ステップ型の負荷増加量を連続値として与えることで、数秒間の安定性を示す短時間電圧安定性を定量的に調べることができる。本論文では、詳細モデルの再構成が容易なモジュラーモデリングに基づいたシミュレーションを採用し、IEEE 9 bus system に all-to-all coupling の 3 端子 DC システムを接続した AC/MTDC システムに対して適用した。そして、この AC/MTDC システムでは過渡安定性の維持ならびに改善に関してドループ制御器が有用であることを示した。一方、短時間電圧安定性に関しては、有効電力負荷増加にはドループ制御器、無効電力負荷増加には交流電圧制御器が有用であることを示した。

第 5 章では、それぞれの検討で得られた知見についてまとめ、今後の課題について述べた。

## 審査結果の要旨

本論文は、既存交流システムへの洋上風力発電の導入を目的とした、交流・多端子直流システムにおける電圧安定性および過渡安定性に関する課題の解決について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 交流システムにおける故障発生時の過励磁制限による電圧低下防止を目的とした、電圧無効電力制御の計算速度および解の収束性に関する性能向上のための新たな手法を提案した。提案手法では、最適化計算にメタヒューリスティクス的一种である粒子群最適化を適用し、電圧安定性維持に貢献する制御機器を優先的に活用する解探索を導入することにより、制約条件を満たす最適解の割合および計算時間の両側面における性能向上を確認した。
- (2) 交流・多端子直流システムの過渡安定性の評価のために、複合型リアプノフ関数を提案し、平衡点に対する安定領域を可視化すると共に、その十分条件を導出した。提案する解析手法により導出されるシステムの安定領域を評価することにより、多端子直流システムのダイナミクスは交流システムに対して大きな影響を及ぼすことを示した。
- (3) 交流・多端子直流システムの過渡安定性および短時間電圧安定性に対して、自励式変換器の制御方式が及ぼす影響について解析した。その結果、ドループ制御器は、過渡安定性および有効電力変化に対する短時間電圧安定性の向上に対して有効であり、交流電圧制御器は、無効電力変化に対する短時間電圧安定性の向上に対して有効であることを示した。

以上の諸成果は、再生可能エネルギーの大量連系を促進する将来の交流と多端子直流から構成される電力システム構築のための知見を与え、電力の安定供給に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。