



Title	モジュラー・マルチレベル方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に関する研究
Author(s)	中村, 文則
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/82240
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

モジュラー・マルチレベル方式電力系統用
大容量電力変換器の実用化に関する研究

中 村 文 則

2021年 1月

大阪大学大学院工学研究科

内容梗概

近年、環境負荷低減を目的として、再生可能エネルギーを利用した発電電力の割合が増加しつつあり、2035 年頃までの各国目標によると、その割合は 22%から 60%に達することが見込まれる。

これら再生可能エネルギーの多くが太陽光や風力といった短時間での変動が大きな自然エネルギーによって占められており、再生可能エネルギー発電の占める割合が大きくなるに従い、交流電力系統に電圧変動や周波数変動といった不安定現象を発生させる課題がある。交流電力系統の安定性は、交流電力系統全体の送電機能に影響を与えるとともに、需要家負荷機器へも影響を与える。従って交流電力系統の不安定現象は望ましくない。

交流電力系統の不安定現象を解決するために、従来は SVC(Static Var Compensator)や変圧器多重方式 STATCOM(STATIC synchronous COMPensator)といった無効電力補償装置や、他励式の HVDC(High Voltage DC transmission)、BTB(Back-To-Back)といった有効電力融通装置が用いられてきた。これら機器にて、一定の導入効果は得られるものの、(1) SVC においては、高調波が発生するため、相当容量の高調波フィルタが必要である、比較的低速応答である、(2) 変圧器多重方式 STATCOM においては、変圧器偏磁過電流により保護停止が発生する、多重変圧器の製作制約のため大容量化に限界がある、多重変圧器一次側が直列結線されており冗長設計が容易でない、(3) 他励式 HVDC、BTB においては、無効電力用調相設備が必要である、高調波フィルタが必要である、無効電力の制御ができない、といった問題点がある。

一方、サブモジュール(SM: SubModule)もしくはセルと呼ばれる単相の半導体変換器を直列に接続する構成を特徴とするモジュラー・マルチレベル変換器(MMC: Modular Multilevel Converter)は、発生高調波が小さいため高調波フィルタを小容量化もしくはなしとできる、SM 数が容易に設計変更できるため大容量化が容易で冗長設計も容易である、自励式変換器であるため高速応答が可能であり有効電力と無効電力を独立に制御可能である、といった優れた特徴がある反面、実用化に際しては、弱小系統への導入に関する制御上の課題、全 SM ごとに独立した直流コンデンサを備えていることに起因した課題、ならびに SM が直列接続されていることにより高電圧に起因した課題がある。

本研究では、これらの実用上の課題に対して以下の(1)～(4)に示す検討を行った。

(1) MMC 方式 STATCOM における交流電圧制御(AC-AVR: AC-Automatic Voltage Regulator)の弱小系統での安定性を、固有値解析により検討し、対策として、不安定を検出し自動的に AC-AVR のゲインを調整できる AGC(Auto Gain Control)を検討した。検討方式は装置制御盤に実装し、RTDS リアルタイムシミュレータを用いて効果を検証した。(2) 単独系統移行時に系統から直流コンデンサを充電できなくなった場合でも、直流コンデンサ電圧を監視することによって待機時間を延長する待機時間制御方式を検討し、リアルタイムシミュレー

タを用いて効果を検証した。(3) MMC 方式 STATCOM の実用化に際して、多数の SM 直流コンデンサを交流系統から充電しつつ、STATCOM の発生無効電力の交流電力系統への影響がない工場試験方式ならびに現地試験方式を検討し、装置を用いて検証した。(4) MMC 方式 BTB では、直列接続された SM が直流地絡時に過大な短絡電流を発生し SM の素子故障を招く可能性があるが、短絡電流を発生させない接地方式を検討し、瞬時値解析にて回路定数の電氣的条件を算出した。

本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、以下のとおり構成される。

第 1 章では、本研究の背景として、世界の再生可能エネルギー発電の動向とその結果発生する諸問題を検討し、解決策としての MMC 方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に際しての検討課題を導出する。

第 2 章では、MMC 方式 STATCOM における系統安定化に関して、AC-AVR 制御系の設計方法を検討した上で、弱小系統接続時の自動ゲイン変更制御、単独系統移行時の待機時間制御について述べる。

第 3 章では、MMC 方式 STATCOM における、交流電力系統への影響が小さい工場試験方式ならびに現地試験方式について述べる。

第 4 章では、MMC 方式 BTB における、直流地絡発生時に直流短絡に至らない接地方式ならびにその回路定数の条件について述べる。

第 5 章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題を述べる。

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	5
参考文献	7
第 2 章 MMC 方式 STATCOM による系統安定化制御	10
2.1 緒言	10
2.2 MMC-STATCOM による系統安定化の課題	12
2.2.1 系統短絡容量比変化による交流電圧制御の不安定化	12
2.2.2 単独系統移行時の待機時間制約	12
2.3 系統電圧安定化制御方式の検討	13
2.3.1 検討の前提条件	13
2.3.2 AC-AVR の設計	15
2.3.3 AGC の検討	19
2.3.4 待機時間制御の検討	23
2.4 リアルタイムシミュレータによる制御系確認試験	24
2.4.1 リアルタイムシミュレータ装置	24
2.4.2 Step 応答試験	27
2.4.3 AGC 確認試験	29
2.4.4 待機時間制御確認試験	31
2.4.5 FIDVR 発生時の系統安定化効果確認試験	33
2.5 実用化装置波形による系統安定化効果の確認	35
2.5.1 装置構成	35
2.5.2 Step 応答試験	39
2.5.3 2LS 事故時の系統安定化結果	39
2.6 結言	40
参考文献	41
第 3 章 MMC 方式 STATCOM 実用化のための試験方法	42
3.1 緒言	42
3.2 MMC 方式 STATCOM の課題	43
3.3 装置の構成ならびに仕様	44
3.4 工場試験（形式試験）の方法と結果	44

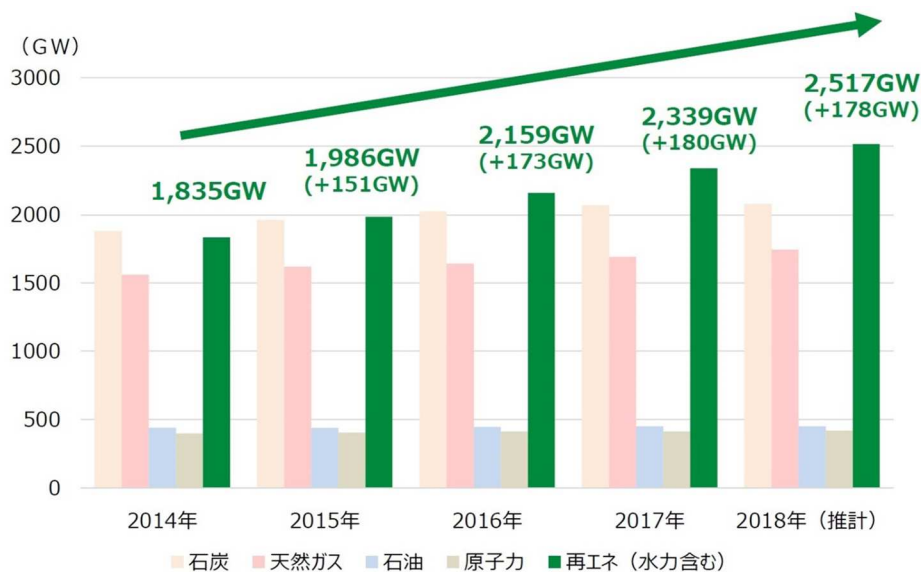
3.4.1 IEC62927 の試験項目	44
3.4.2 通電試験方式の検討	45
3.4.3 試験結果	48
3.5 現地試験(システムチェック試験)の方法と結果	50
3.5.1 現地試験項目	50
3.5.2 システム試験項目	51
3.5.3 システムチェック試験方法の検討	53
3.5.4 循環電流試験結果	54
3.6 結言	55
参考文献	55
第 4 章 自励式 BTB の接地方式に関する研究	57
4.1 緒言	57
4.2 BTB システムの接地方式比較	58
4.2.1 直流側接地方式	58
4.2.2 交流側接地方式	62
4.3 交流側中性点接地リアクトル設計手法検討	65
4.3.1 三次高調波電流の検討（地絡時電流の検討）	65
4.3.2 対地浮遊キャパシタンスの検討（定常運転時の電流検討）	66
4.3.3 浮遊キャパシタンスとの共振検討（定常運転時の電流検討）	68
4.3.4 大地漏れ抵抗影響の検討（定常運転時の対地電圧検討）	68
4.4 リアクトル小型化検討	69
4.4.1 空心リアクトルでの解析	69
4.4.2 鉄心リアクトルの適用検討	70
4.4.3 VI 特性での抑制検討	72
4.4.4 限流抵抗での抑制検討	73
4.5 設計手法のまとめ	76
4.6 結言	77
参考文献	77
第 5 章 結論	79
謝辞	81
本研究に関連した対外発表等	82

第1章 緒論

1.1 研究の背景

近年、環境負荷低減を目的として、再生可能エネルギーを利用した発電電力の割合が増加しつつある。図 1 - 1 は 2014 年から 2018 年にかけての世界全体の発電設備種別ごとの容量変化を示した図である^[1]。図 1 - 1 よりわかるとおり、4 年間で再生可能エネルギーの設備容量は 1.4 倍に増加している。また図 1 - 2 は、再生可能エネルギーの発電比率に関する世界動向であり、2017-2018 年のエネルギー種別ごとの割合ならびに 2020 年から 2035 年の世界各国の比率目標を示している。図 1 - 2 によると、米国、中国、カナダを除く各国の 2035 年頃までの目標は 22%(日本)から 60%(ドイツ)とさらなる比率増加が見込まれる。なお米国と中国を除いたのは基準が異なるため、カナダを除いたのは目標を定めていないためである。

これら再生可能エネルギーの多くが太陽光や風力といった自然エネルギーによって占められているが、自然エネルギーによる発電の問題点は短時間での発電電力量の変動である。発電電力量の変動は交流電力系統に電圧変動や周波数変動といった不安定現象を発生させるが、再生可能エネルギーの割合が大きくなると顕著になる。交流電力系統の安定性は、交

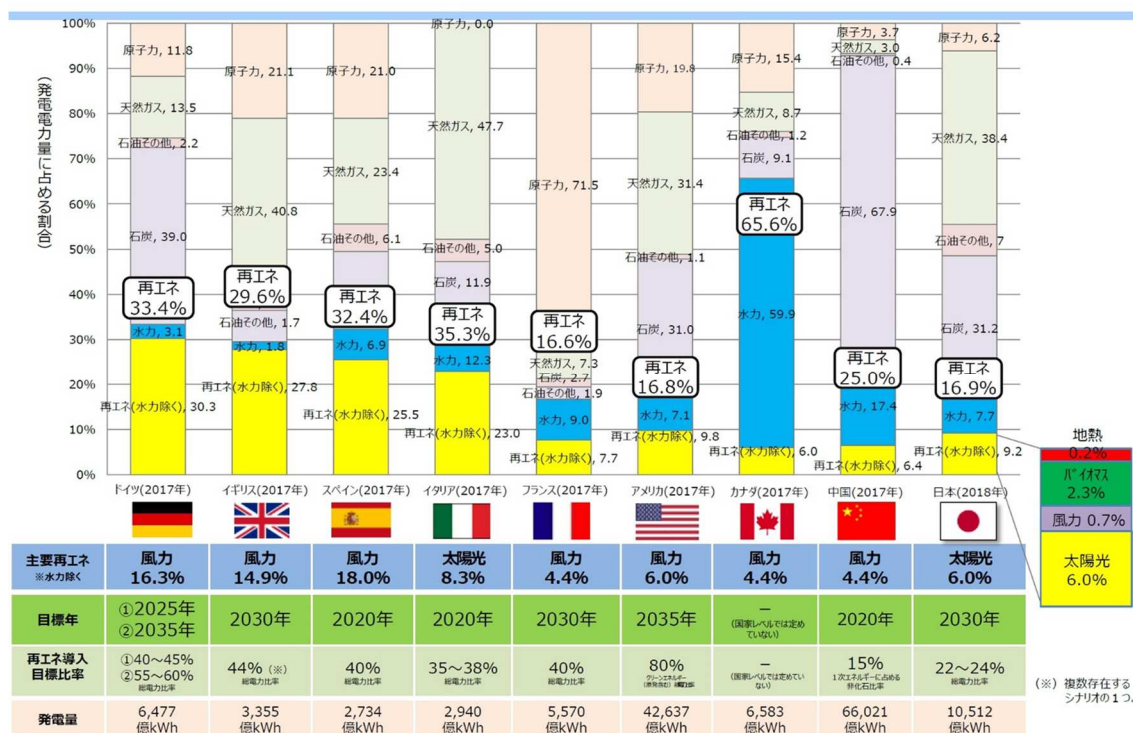


IEA「World Energy Outlook」2016～2019年度版より資源エネルギー庁作成

出典：資源エネルギー庁第 61 回調達価格等算定委員会資料「国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案」^[1]

図 1 - 1 世界全体の発電設備容量

第1章 緒論



出典：資源エネルギー庁第61回調達価格等算定委員会資料「国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案」^[1]

図1-2 世界の動向：再生可能エネルギーの発電比率

流電力系統全体の送電機能に影響を与えるとともに、需要家負荷機器へも影響を与える。従って交流電力系統の不安定現象は望ましくない。

交流電力系統の不安定現象を解決する目的では、従来より SVC(Static Var Compensator) や変圧器多重方式 STATCOM(STATIC synchronous COMPensator)といった無効電力補償装置や、他励式の HVDC(High Voltage DC transmission), BTB(Back-To-Back)といった有効電力融通装置が用いられてきた。図1-3に SVC の、図1-4に変圧器多重方式 STATCOM の、図1-5に他励式 HVDC の構成例を示す^{[2][3][4][5]}。SVC と他励式 HVDC, BTB については、電流ゼロ点でしかオフできない Thyristor が用いられるが、STATCOM ならびに自励式 HVDC, BTB については、GCT(Gate Commutated Turn-off) Thyristor や IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) といった自励式素子を用いており、系統電圧に依存せずオン・オフ自在という特徴がある^[6]。このため、STATCOM ならびに自励式 HVDC, BTB は、SVC もしくは他励式 HVDC, BTB と比べると、発生高調波が低い、より高速応答が得られるというメリットがある。

これら機器は一定の系統安定化効果は得られるものの、それぞれ以下の(1)～(3)の問題点があった。

(1) 図1-3に示したとおり、SVC はサイリスタ制御リアクトル(TCR: Thyristor

Controlled Reactor)とサイリスタ開閉コンデンサ(TSC: Thyristor Switched Capacitor)を用いて無効電力を調整するが、サイリスタが自己消弧不可能なため低次高調波が発生し、相当容量の高調波フィルタが必要である、サイリスタが交流基本波周期ごとにしか点弧機会がないため比較的応答速度が低い。

(2) 図 1 - 4 に示した変圧器多重方式 STATCOM においては、変圧器偏磁過電流により保護停止が発生する、多重変圧器の製作制約のため大容量化に限界があるという問題があった。また単位変換器を用いての冗長設計は容易でない。

(3) 図 1 - 5 に示した他励式 HVDC, BTB においては、サイリスタを適用しているため、無効電力の制御ができないことに加え、無効電力用調相設備が必要である。また、SVC 同様

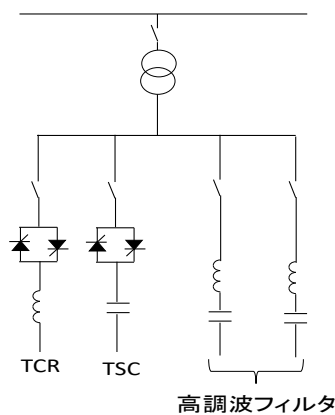


図 1 - 3 SVC 構成例

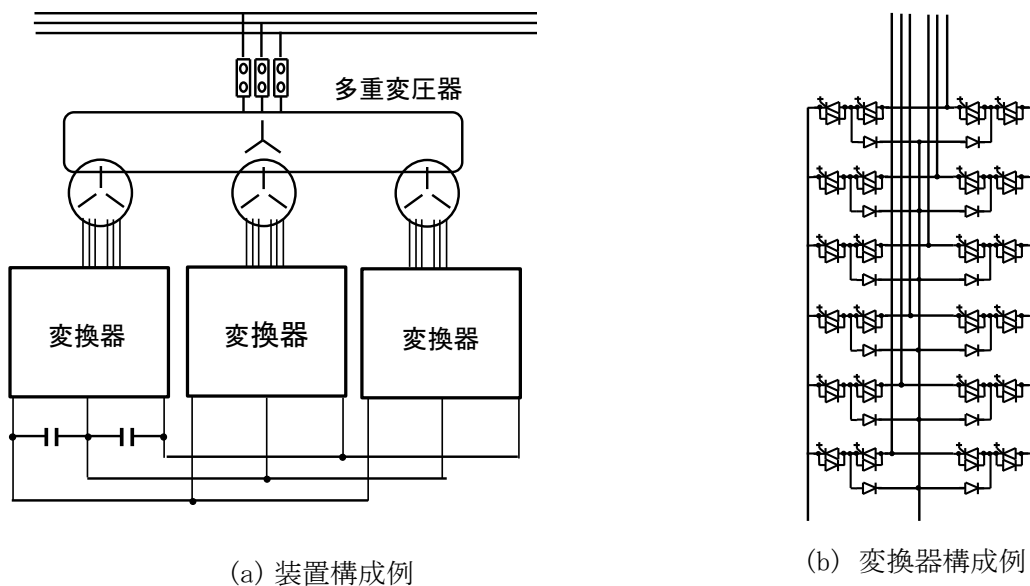


図 1 - 4 変圧器多重方式 STATCOM 構成例

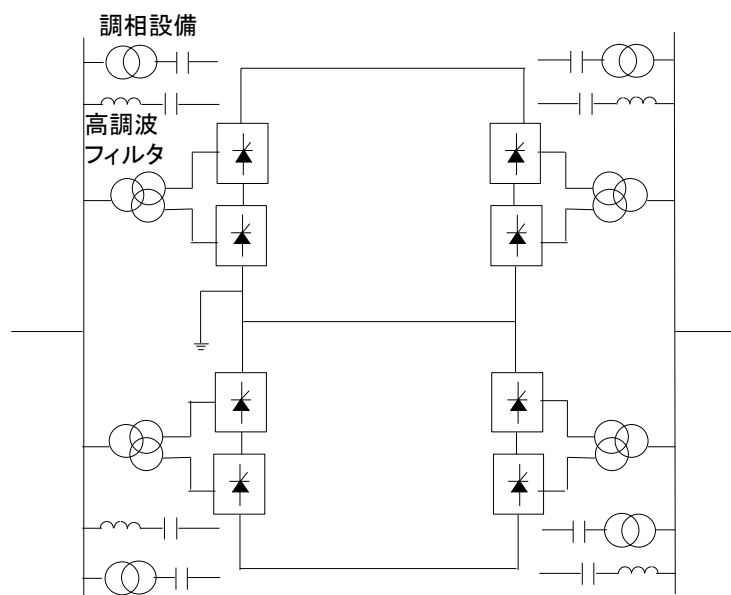
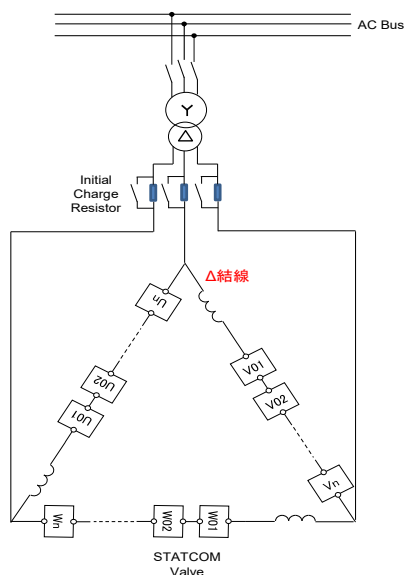


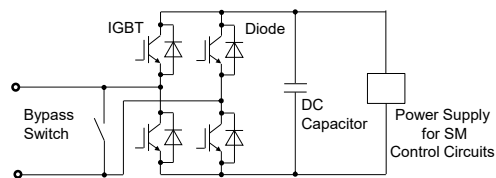
図 1 - 5 他励式 HVDC 構成例

に高調波フィルタが必要である。

一方、近年開発された、サブモジュール(SM: SubModule)もしくはセルと呼ばれる単相の半導体変換器を直列に接続したモジュラー・マルチレベル変換器(MMC: Modular Multilevel Converter)は STATCOM もしくは自励式 HVDC, BTB への適用が可能である [7] [8] [9] [10] [11]。図 1 - 6 は MMC 方式を STATCOM 主回路に適用した構成例、図 1 - 7 は MMC 方式を HVDC もしく

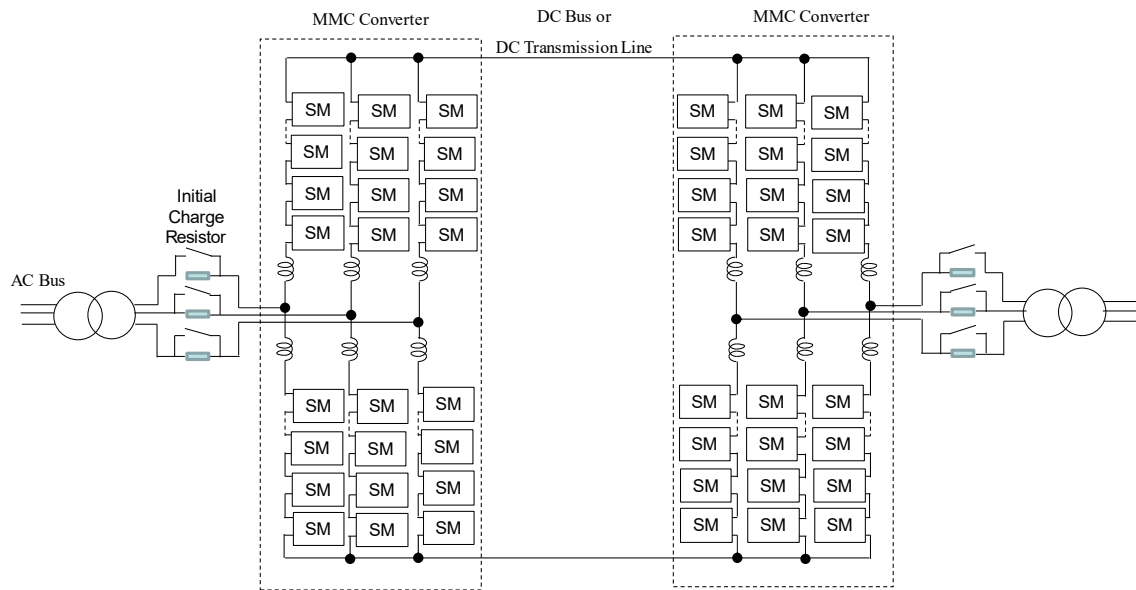


(a) 主回路構成図

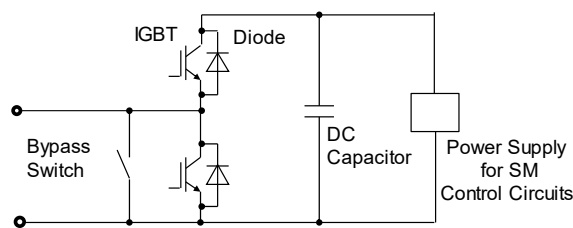


(b) SM 回路構成図

図 1 - 6 MMC 方式 STATCOM の構成例



(a) 主回路構成図



(b) SM 回路構成図

図 1 - 7 MMC 方式 HVDC, BTB の構成例

は BTB に適用した構成例である。MMC 方式は、オンオフ自在な自己消弧型素子を用いていること、変換器容量によるものの、十から数百の SM でスイッチングを行うことにより、発生高調波が小さく高調波フィルタを小容量化もしくははなしとできる、高速応答が可能であるという特徴がある。また、SM 数が容易に設計変更できるため大容量化が容易で冗長設計も容易であるという優れた特徴がある。以上の再生可能エネルギー発電増加に伴う課題と従来の解決手段、MMC 方式の特徴をまとめると図 1 - 8 となる。

1.2 研究の目的

図 1 - 8 に示したとおり、MMC 方式は従来手法での問題点を解決できる優れた特徴を持つ主回路方式であり、SM の接続に関する検討や SM の回路構成に関する検討がなされている [12][13][14][15][16]。また、制御方式についても、直流電圧の制御方式や循環電流の制御方式について検討されている [17][18][19][20][21][22][23]。しかしながら、SM が多数直列に接続される MMC

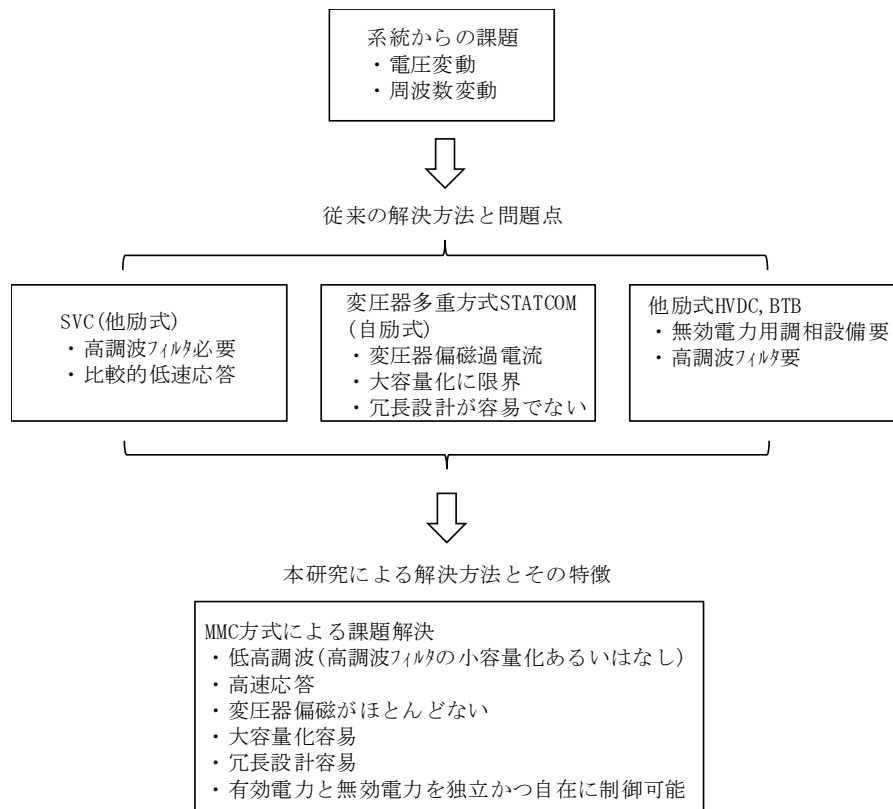


図 1 - 8 再生可能エネルギー発電増加に伴う課題と解決方法

方式は、STATCOM もしくは BTB に適用し実用化する際に、弱小系統に導入する際の制御面での課題、各 SM の直流電圧が独立していることに起因する課題、直流電圧が高電圧となることに起因する課題、があるが、これらの課題に対する実用面からの解決方法は明らかにされていない。

そこで、本研究では MMC 方式大容量電力系統用大容量電力変換器を実用化する際に、特に重要と考える以下の（１）－（４）について検討することにより、実用化に際する課題を解決することを目的とする。

（１）制御面での課題に関する検討

STATCOM の適用範囲が拡大され、例えば放射状の末端系統等弱小系統に導入されて系統短絡容量比(SCR: Short Circuit Ratio)が SCR=2 付近まで小さくなる場合に、交流電圧制御 (AC-AVR: AC-Automatic Voltage Regulator)が不安定となることがある。そこで、MMC 方式 STATCOM における AC-AVR の弱小系統での安定性を、固有値解析により検討し、対策として、不安定を検出し自動的に AC-AVR を調整できる AGC (Auto Gain Control)を検討する。検討方式は実用化装置制御盤に実装し、リアルタイムシミュレータを用いて効果を検証する。

（２）直流コンデンサが独立していることに起因した課題に関する検討その１

MMC 方式は SM を直列に接続する構成であるため、SM 制御基板への電源供給は外部から供給する方式では SM 数分の多数の絶縁された電源を用意する必要があり、SM 内直流コンデンサから供給する図 1 - 6(b)の構成とすることが合理的である。この場合、事故発生時の無電圧待機中に SM 直流コンデンサが放電されるため待機時間に制限があるが、待機時間を極力延長できることが望まれる。そこで、単独系統移行時に系統から直流コンデンサを充電できなくなった場合でも、直流コンデンサ電圧を監視することによって待機時間を延長する待機時間制御方式を検討し、リアルタイムシミュレータを用いて効果を検証する。

(3) 直流コンデンサが独立していることに起因した課題に関する検討その 2

MMC 方式は、全 SM ごとに独立した直流コンデンサを備えており、交流系統からの初期充電が合理的である。しかしながら、工場試験もしくは現地試験で交流系統に接続しての試験は装置出力によっては影響が大であり、交流系統への影響が極力小さい試験方法が必要である。そこで、MMC 方式 STATCOM の実用化に際して、多数の SM 直流コンデンサを交流系統から充電しつつ、STATCOM の発生無効電力の交流電力系統への影響がない工場試験方式ならびに現地試験方式を検討し、実用化装置を用いて検証する。

(4) 直流電圧が高電圧となることによる課題に関する検討

MMC 方式を HVDC もしくは BTB に適用した場合、直流電圧が従来の回路方式より高電圧となるが、接地方式によっては万一の短絡発生時に大電流によって SM 故障を発生させる。直流短絡の発生しない接地方式が必要である。そこで、MMC 方式 BTB において、直流地絡時に過大な短絡電流を発生させない接地方式を検討し、瞬時値解析にて回路定数の電氣的条件を算出する。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁調達価格等算定委員会：「国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案」，資源エネルギー庁第 61 回調達価格等算定委員会資料（2020）
- [2] D. Sullivan, J. Paserba, T. Croasdaile, R. Pape, M. Takeda, S. Yasuda, H. Teramoto, Y. Kono, K. Temma, A. Johnson, R. Tucker and T. Tran: “Dynamic voltage support with the rector SVC in California’ s San Joaquin Valley” ,2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (2008)
- [3] T. Akedani, J. Hayashi, K. Temma and N. Morishima; “450MVA STATCOM installation plan for stability improvement” ,Proceedings of 2010 CIGRE, Paper B4-207 (2010)
- [4] T. Imanishi, Y. Nagatomo, S. Iwasaki, K. Masakiy, T. Fujii and J. Ieda: “130MVA-STATCOM for Transient Stability Improvement” ,IPEC-Hiroshima 2014 Conference Records, pp.2663-2667 (2014)

- [5] 齊藤 紀彦, 高島 弘, 布施 和夫:「紀伊水道直流送電プロジェクト」, 電学論 B, Vol. 118, No. 9, pp. 927-930 (1998)
- [6] D. Sullivan, B. Buterbaugh, J. Paramalingam, F. Nakamura, A. Matsuda, D. Yamanaka and T. Tsuchiya: “Application of FACTS Devices for a Dynamic Power System within the USA”, IPEC-Niigata 2018, pp. 2329-2334 (2018)
- [7] A. Alesina and M.G.B. Venturini: “Solid-state power conversion: A Fourier analysis approach to generalized transformer synthesis”, IEEE Trans. Circ. Sys., Vol. cas-28, No. 4, pp. 319-330 (1981)
- [8] R. Marquardt and A. Lesnicar: “A new modular voltage source inverter topology”, in Conf. Rec. EPE 2003, CD-ROM (2003)
- [9] M. Glinka and R. Marquardt: “A new single-phase ac/ac-multilevel converter for traction vehicles operating on ac line voltage”, in Conf. Rec. EPE 2003, CD-ROM (2003)
- [10] M. Glinka: “Prototype of multiphase modular-multilevel-converter with 2MW power rating and 17-level-output-voltage”, in Conf. Rec. IEEE-PESC 2004, pp. 2572-2576 (2004)
- [11] M. Glinka and R. Marquardt: “A new ac/ac multilevel converter family”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 52, No. 3, pp. 662-669 (2005)
- [12] 赤木 泰文, 萩原 誠:「モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器 (MMCC) の分類と名称」, 2010 年電気学会全国大会, 4-043 (2010)
- [13] 川村 弥, 赤木 泰文:「モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器 (MMCC-TSBC) の制御法」, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 1-49, pp. 241-246 (2012)
- [14] E. Solas, G. Abad, J. A. Barrena, S. Aurtenetxea, A. Cárcar and L. Zając: “Modular Multilevel Converter With Different Submodule Concepts-Part II: Experimental Validation and Comparison for HVDC Application”, IEEE Transactions on Industrial Electronics Volume, Vol. 60, No. 10, pp. 4536 - 4545 (2013)
- [15] H. Kim, J. Kang, S. Kim, C. Kim and K. Hur: “DC fault protection for modular multilevel converter HVDC using asymmetrical unipolar full-bridge submodule”, ICPE-ECCE Asia 2015, pp. 1083-1089 (2015)
- [16] W. Hu, Y. Dong, G. Li, W. Li and X. He: “Second-order Circulating Current Injection Based Capacitor Voltage Balance Control for Hybrid Modular Multilevel Converters”, COMPEL 2018 (2018)
- [17] 萩原 誠, 前田 亮, 赤木 泰文:「モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器 (MMCC-SDBC) の STATCOM への応用-有効電力・逆相無効電力制御-」, 電学論 D, Vol. 131, No. 12, pp. 1433-1441 (2011)

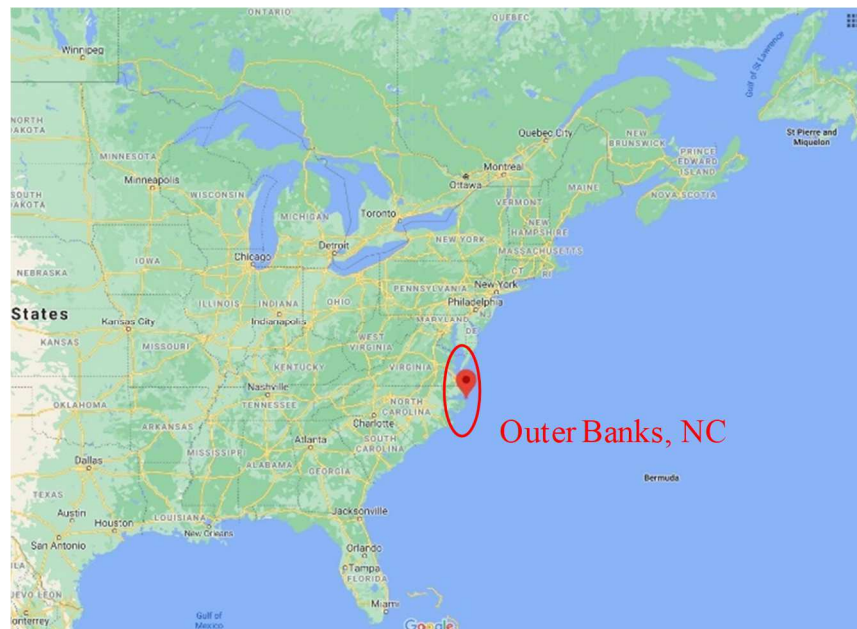
- [18] 井上 重徳, 加藤 修治:「零相キャンセル形モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器のミニモデル試験」, 電気学会電力技術研究会資料, PE-11-188, pp. 31-36 (2011)
- [19] 藤田 英明, 萩原 誠, 赤木 泰文:「MMCC-DSCC 方式モジュラーマルチレベルコンバータのパワーフロー解析と直流コンデンサ電圧の制御」, 電学論 D, Vol. 132, No. 6, pp. 659-665 (2012)
- [20] 児山 裕史, 長谷川 隆太, 新井 卓郎, 鈴木 大地:「デルタ結線モジュラー・マルチレベル STATCOM の 1 パルス制御」, 電学論 D, Vol. 137, No. 3, pp. 246-255 (2017)
- [21] K. Nada, T. Kikuchi, T. Takuno, T. Fujii, R. Uda, T. Sugiyama: “Capacitor Voltage Control of MMC-STATCOM during Unbalanced AC System Fault”, IPEC-Niigata 2018, pp. 3578-3583 (2018)
- [22] J. Kucka, A. Mertens: “Common-Mode Voltage Injection Techniques for Quasi Two-Level PWM-Operated Modular Multilevel Converters”, IPEC-Niigata 2018, pp. 1904-1911 (2018)
- [23] T. Tanaka, H. Wang and F. Blaabjerg: “A DC-link Capacitor Voltage Oscillation Reduction Method for a Modular Multilevel Cascade Converter with Single Delta Bridge Cells (MMCC-SDBC) ”, IPEC-Niigata 2018, pp. 2604-2610 (2018)

第2章 MMC方式STATCOMによる系統安定化制御

2.1 緒言

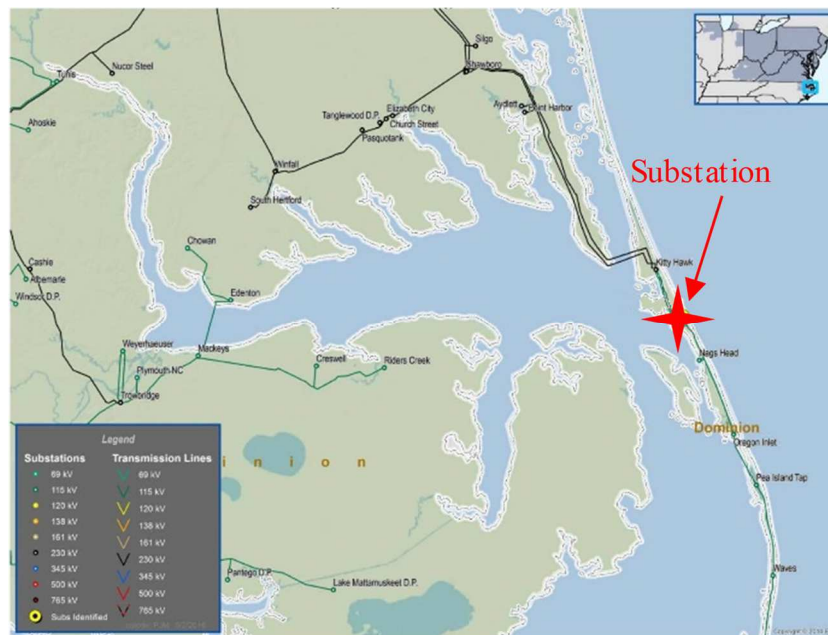
図2-1に、米国東部海岸OBX(Outer Banks)の位置を示す。OBXは、南東バージニアからノースカロライナ北部に広がる320kmの弓なりの半島ならびに砂州の連なりである^[1]。この地域は、亜熱帯気候で開放的な砂浜の広がる国際的観光地で、6月から8月の夏の期間中は人口が3倍-5倍に増加する。また、この期間は、その高温・多湿ゆえ、ほとんどの居住者ならびに行楽客は、ほぼ常時空調を使う。この地域は、図2-2に示したとおり、電力会社の末端系統に位置し、電源がほとんど接続されない^[2]。空調機器は誘導電動機負荷が主であり、夏場の負荷比率が高い時期には、FIDVR(Fault Induced Delayed Voltage Recovery)と呼ばれる系統事故時の電圧回復遅れを引き起こす。FIDVR対策としては、電力系統電圧によらず、定電流出力が可能であるSTATCOMの方が、系統電圧低下時に電流出力が小さくなるSVCより有利である^[3]。また、応答速度の面でも、STATCOMの方が高速応答が可能で有利である。

1997年、FIDVR対策として、SVCが導入された。しかしながら、経年とともに、スペアパーツの入手に制約が発生し、設備全体の老朽化、特に塩分や湿度といった海沿い環境による屋外機器への悪影響を考慮して、装置を更新することとなった。当該地域を統括するPJM Interconnection L.L.Cのガイドラインによると、想定される最過酷事故時（1回線が保守



出典：Google Map

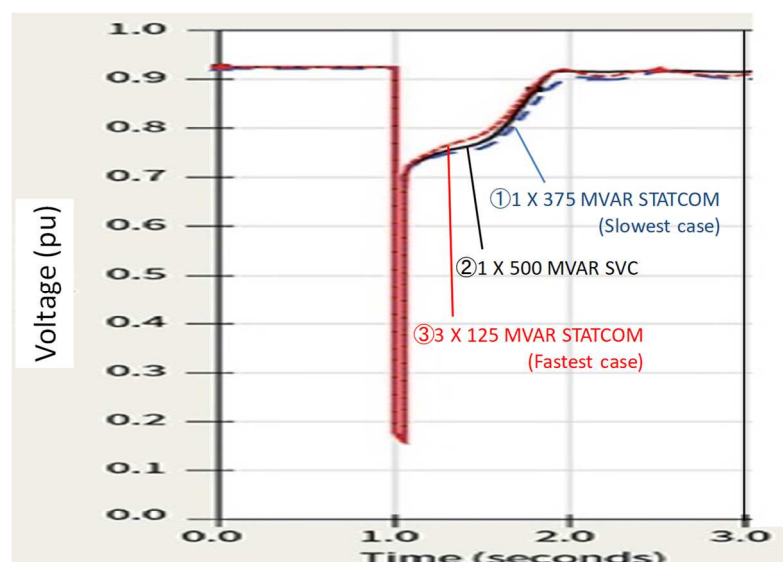
図2-1 米国 Outer Banks 位置図



出典：PJM Staff Whitepaper “Baseline Project B2757”

図 2 - 2 米国南東バージニア電力系統図

等で停止している場合に別の 1 回線で事故が発生) でも 115kV 系統電圧の過渡電圧回復を 2.5 秒で定格の 70%に復電することが必要である^[4]。図 2 - 3 に①375MVAR の STATCOM 1 台, ②500MVAR の SVC1 台, ③125MVAR の STATCOM3 台を分散設置した際, の事故時電圧回復特性比較を示す^[5]。図 2 - 3 によると, 125MVAR の STATCOM3 台の場合は, 375MVAR の STATCOM



出典：R&D World “The STATCOM Solution”

図 2 - 3 無効電力補償装置の構成による事故時電圧回復特性の比較

1台の場合と比べると、1.2秒付近ならびに2秒付近で0.1pu程度電圧回復が早い。また、500MVARのSVC1台と比べると、1.2秒付近で0.1pu程度電圧回復が早い。すなわち、全時間領域で125MVARのSTATCOM3台の場合が一番電圧回復が早く、このことより定格容量125MVARのSTATCOM3台を導入することとなった。結果、1997年に導入されたSVCの更新器は容量125MVARのSTATCOMとし、残り2台は新規に設置することとなった。

本章では、更新STATCOMの導入にあたり、低短絡容量時にAC-AVRの不安定を検出し制御定数を自動で変更するAGC、ならびに系統事故時の無電圧に伴う待機時間を延長する待機時間制御を検討し、リアルタイムシミュレータならびに実用化装置での採取波形による動作確認結果について説明する。

2.2 MMC-STATCOMによる系統安定化の課題

2.2.1 系統短絡容量比変化による交流電圧制御の不安定化

系統安定化目的の場合、STATCOMは系統電圧が設定指令値となるようにAC-AVRで運転される。AC-AVR制御系は、制御対象である電力系統の特性に応じて設計され、一般には系統の短絡容量比(SCR)を用いて設計される。

しかしながら、STATCOMの接続される図2-2の地点では、通常運用のSCRは6.7-9.1の範囲であるものの、系統条件の変化により上記範囲を逸脱して小さくなる場合がある。SCRが非常に小さくなると、AC-AVRが不安定となる可能性があるため、不安定を検出し自動的にAC-AVRを調整できるAGCが搭載されることが望まれる。

2.2.2 単独系統移行時の待機時間制約

1.1節に述べたとおり、STATCOMの各SMに実装される制御基板電源は、それぞれのSMの直流コンデンサから供給される構成とした。このため、各SM制御基板の駆動には、交流電力系統からの電力供給が不可欠である。

本STATCOMの接続系統は、上位変電所との接続系統上で事故が発生した場合、事故除去時の系統遮断器開放操作で一旦無電圧となる。通常はおよそ80msで閉路し復電するが、この時点で事故除去ができなかった場合、再開路-再開路となり、およそ10秒間無電圧となる。STATCOMは、系統電圧低下に伴い一旦待機状態に移行するが、電源喪失・制御基板停止による無制御状態を避けるため、予め設定された1秒のタイマーにて変圧器一次側遮断器を開放し、完全停止に移行する設計としていた。しかしながら、事故除去後の系統電圧安定化のためには、STATCOMの待機時間を可能な限り延長する制御方式の搭載が望まれる。

2.3 系統電圧安定化制御方式の検討

2.3.1 検討の前提条件

本検討に用いた STATCOM の主回路構成図を図 2 - 4 に、定格事項を表 2 - 1 に、全制御系のブロック図を図 2 - 5 に示す。図 2 - 4 に示したとおり、本章の検討では STATCOM 電流の極性は変圧器から STATCOM に流れる向きを正に、無効電力の極性は STATCOM がキャパシティブ動作する時を正とする。制御系は大きく分けて、無効電流を制御する「交流電圧制御系」、有効電流を制御する「直流コンデンサ平均電圧制御系」、SM 間の直流電圧をバランスする「直流バランス制御系」で構成する [6]。

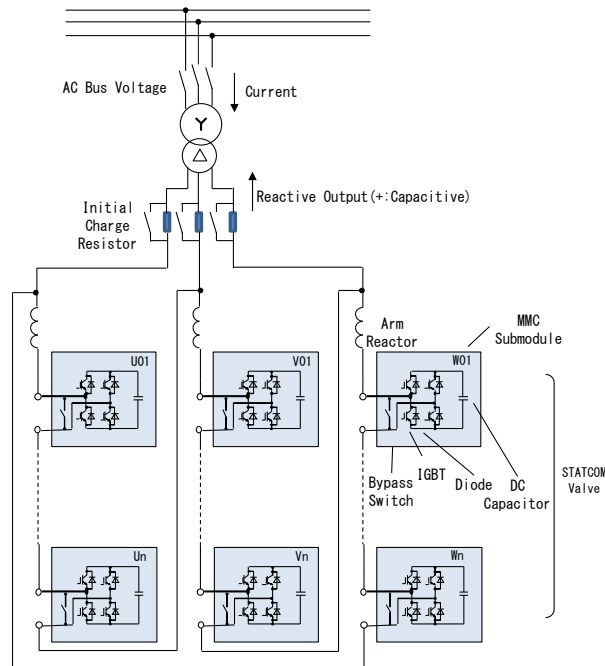


図 2 - 4 検討対象の MMC STATCOM 主回路構成図

表 2 - 1 検討対象の STATCOM の定格事項

Rated capacity	125Mvar
Overload capability	1.25pu
AC bus voltage	115kV
AC system frequency	60Hz
Rated AC current (primary)	630A
Main circuit configuration	MMC
Power device	IGBT

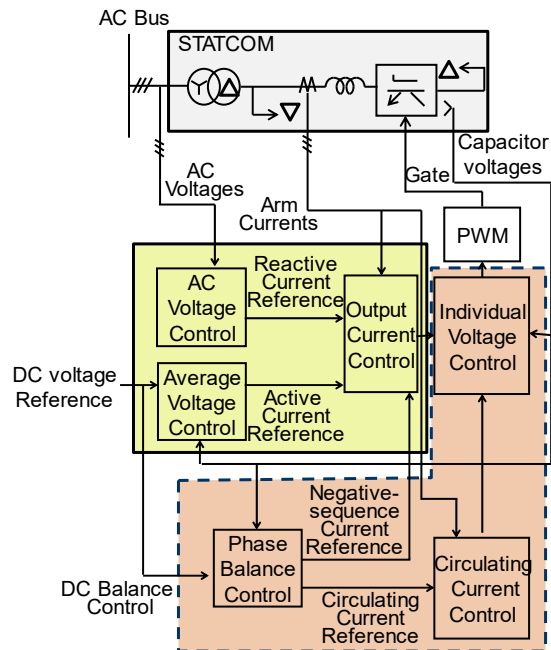


図 2 - 5 検討対象の MMC STATCOM 制御系ブロック図

(1) 交流電圧制御系 (AC Voltage Control)

「交流電圧制御系」は、電圧検出器で検出した変圧器一次側の交流電圧実測値を、与えられた指令値に一致させるように制御する制御系である。交流電圧を上昇させるためにキャパシティブ無効電流を、交流電圧を低下させるためにリアクティブ無効電流を STATCOM が出力する。系統電圧のフィードバックは、2相成分二乗和の平方根にて実効値を得ているが、逆相成分を除去し、正相成分のみを抽出する目的で基本波周期の移動平均フィルタを用いる。

(2) 直流コンデンサ平均電圧制御系 (Average Voltage Control)

「直流コンデンサ平均電圧制御系」は全 SM の直流電圧平均値をあらかじめ設定された設定電圧に制御する制御系である。直流電圧を上昇させるには系統から有効電力を吸収、直流電圧を低下させるには有効電力を放出する。

(3) 交流電流制御系 (Output Current Control)

「交流電流制御系」は STATCOM の出力交流電流を制御する電流制御 (ACR: Automatic Current Regulator) で、STATCOM 出力電流を、「交流電圧制御系」から与えられる無効電流指令と、「直流コンデンサ平均電圧制御系」から与えられる有効電流指令、に一致するように制御する。

「直流バランス制御系 (DC Balance Control)」は、MMC 方式特有の制御系で、SM ごとに独

立した直流コンデンサの直流電圧を均一にするための制御系である。「直流バランス制御系」は以下の（４）－（７）より構成される。

（４）相バランス制御(Phase Balance Control)

相バランス制御は、各アーム間の直流電圧平均値のばらつきを制御する。相電圧制御では、各アームの直流電圧平均値を指令値と比較し、その差分を制御したのち零相成分を算出して循環電流指令として、他方では逆相成分を検出して逆相電流指令として出力する。

（５）循環電流制御(Circulating Current Control)

循環電流制御は、循環電流を指令値に制御する。循環電流制御はアーム電流より求めた循環電流フィードバックを用いたフィードバック制御系を形成し、電圧指令値を個別電圧制御に出力する。これは三相アームの全てに一定の電圧指令補正值を与え、所望の循環電流を流すためである。

（６）個別電圧制御(Individual Voltage Control)

個別電圧制御は、各アームの SM 間での直流電圧ばらつきを補正する。アーム毎の直流電圧平均値と SM の個別直流電圧フィードバックを線形制御し、SM の通過電流によって直流コンデンサを充放電して個別電圧を制御する。

（７）逆相電流指令(Negative Sequence Current Reference)

逆相電流指令は、相バランス制御から出力され、電流制御に入力される。本制御方式は、各アームの交流電圧に不平衡を発生させ、各アームの直流電圧ばらつきを強制的に補正する方法である。この制御を付加することによって、不平衡事故時の直流電圧変動を大幅に改善することができる。

以上、従来の STATCOM でも用いられてきた（１）－（３）の制御系に加え、MMC 方式 STATCOM 特有の（４）－（７）により各アームの直流電圧平均値ならびに各 SM の平均電圧を所望の指令値に制御する。

2.3.2 AC-AVR の設計

図 2 - 6 に AC-AVR の詳細制御ブロック図を示す。AC-AVR の制御ブロックは従来から実績のある SVC の制御ブロックと同一とし、定常偏差を補償できるよう PI 制御を用い、スロープリアクタンス特性を設定できるようにフィードバックループを設けている。なお、図 2 - 6 中の K_{AGC} は 2.3.3 項にて検討する AGC のための入力信号で、通常は 1.0 が入力される。制御定数 K_{AVR} 、 T_{AVR} の設計は、装置要求仕様として与えられた「電圧指令値 3% の Step 応答での、最終値までの変化幅の 90% 到達時間 50ms 以内」を満たすよう設計される必要がある。

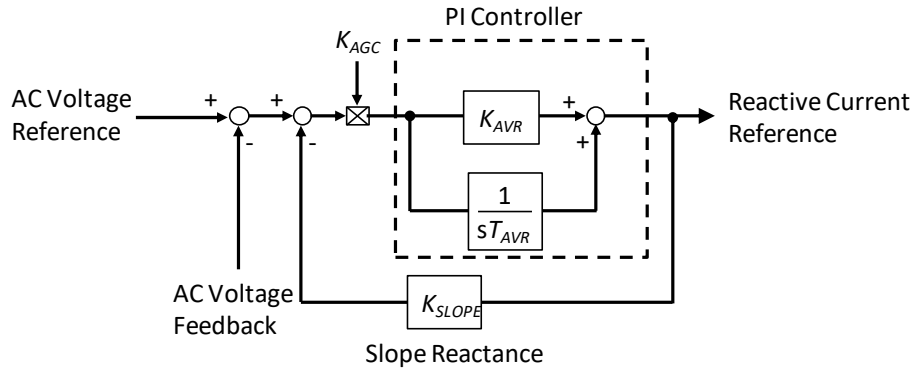
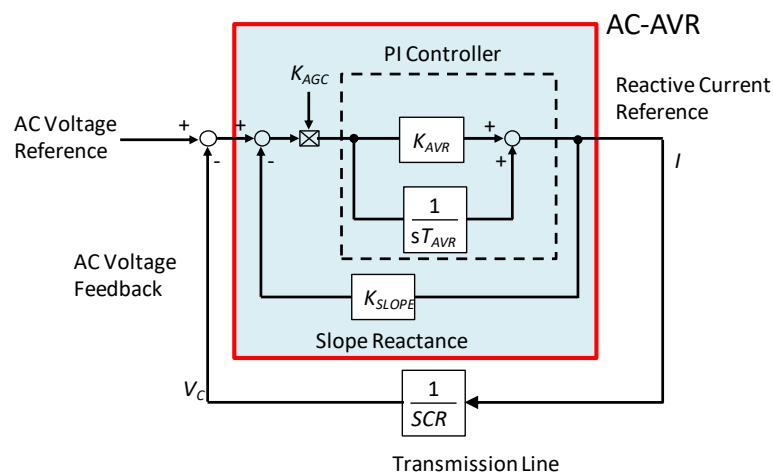


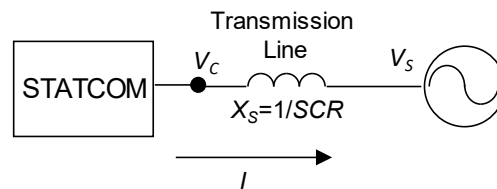
図 2 - 6 AC-AVR 制御ブロック図

制御定数 K_{AVR} , T_{AVR} の設計手法は以下のとおりとする。

図 2 - 7 は、MATLAB/SIMULNK を用いた、系統電圧指令に対する系統電圧フィードバックのゲイン周波数特性を求めるための解析モデルである。図 2 - 7 のモデルでは、 K_{AVR} , T_{AVR} の変化に伴う AC-AVR の周波数特性変化の傾向を評価するため、STATCOM は AC-AVR が出力する無効電流指令に一致した無効電流 I を出力する理想電流源モデルとした。図 2 - 7 のモ



(a) シミュレーション解析ブロック図



(b) 電気回路モデル

図 2 - 7 AC-AVR の周波数特性解析モデル

デルを用いて、 K_{AVR} 、 T_{AVR} を変化させた場合の、系統電圧指令に対する系統電圧フィードバックのゲイン周波数特性を求めた。結果を図 2 - 8 に示す。なお、ここでは $K_{AGC}=0$ 、 $K_{SLOPE}=0$ とし、説明に必要な角周波数 1rad/s 以上の領域を示している。

図 2 - 8 (a)は $T_{AVR}=0.0025$ にて $K_{AVR}=0.1$ から $K_{AVR}=1.0$ に変化させたケース、図 2 - 8 (b)は $K_{AVR}=1.0$ にて $T_{AVR}=0.0025$ から $T_{AVR}=0.025$ に変化させたケースである。図 2 - 8(a)より、応答時間仕様 50ms に相当する角周波数 125rad/s 付近では K_{AVR} を変化させてもゲインはほぼ同じで、400rad/s 以上の高い周波数帯域でゲインが変化していることがわかる。一方、図 2 - 8 (b)では、角周波数 125rad/s 付近のゲインが $T_{AVR}=0.0025$ と $T_{AVR}=0.025$ で大きく変化することがわかる。ここで、AC-AVR の PI 制御 $G(s)$ の特性について検討する。 $G(s)$ は (式 2 - 1) と書ける。

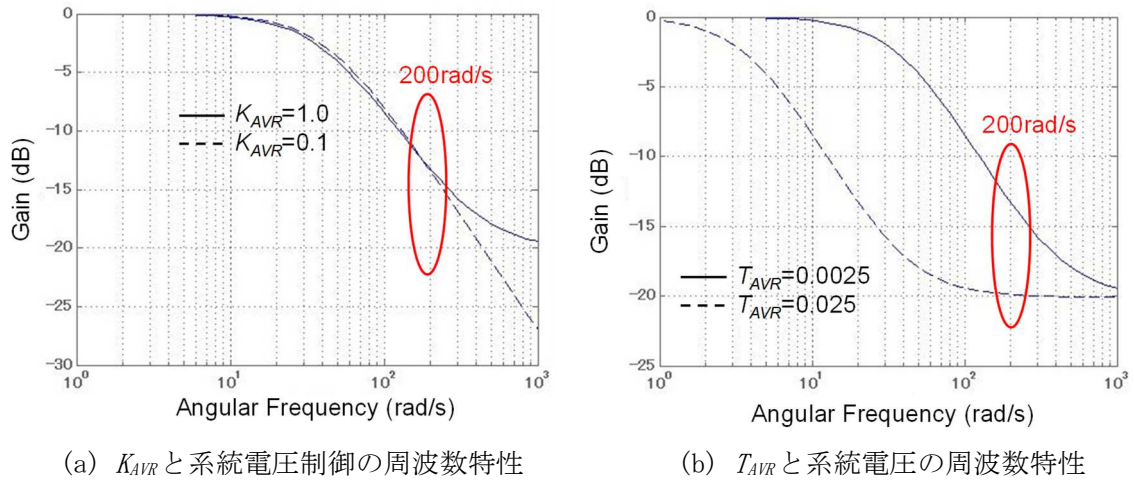


図 2 - 8 K_{AVR} 、 T_{AVR} と系統電圧制御の周波数特性

$$G(s) = K_{AVR} + \frac{1}{sT_{AVR}} \quad (\text{式 2 - 1})$$

角周波数 ω での特性を評価するため、(式 2 - 1) のラプラス微分演算子 s に角周波数 $j\omega$ を代入すると (式 2 - 2) となる。

$$G(j\omega) = K_{AVR} + \frac{1}{j\omega T_{AVR}} \quad (\text{式 2 - 2})$$

(式 2 - 2) より $G(j\omega)$ の絶対値を求めると

$$|G(j\omega)| = \sqrt{K_{AVR}^2 + \frac{1}{\omega^2 T_{AVR}^2}} \quad (\text{式 2 - 3})$$

が得られる。ここで、 $\omega=200\text{rad/s}$ にて平方根中の K_{AVR}^2 、 $\frac{1}{\omega^2 T_{AVR}^2}$ を算出すると、 $K_{AVR}=1.0$ 、

$T_{AVR}=0.0025$ の条件下ではそれぞれ $K_{AVR}^2 = 1.0$ 、 $\frac{1}{\omega^2 T_{AVR}^2} = 4.0$ となり、 K_{AVR} より T_{AVR} の方が

$|G(j\omega)|$ に対して影響が大きいことが確認できる。また、 ω がさらに大きくなると $\frac{1}{\omega^2 T_{AVR}^2}$ の項が小さくなるため、角周波数のより高い領域で T_{AVR} より K_{AVR} の方が $|G(j\omega)|$ に対して影響が大きいことが確認できる。

すなわち、Step応答での仕様時間が50msである本STATCOMのAC-AVR設計では、 T_{AVR} にて応答時間仕様を満たすよう設計し、その後 K_{AVR} を応答波形を見ながら決定する、という手法を設計手法とすることができる。

この設計手法を用いて、任意の値として $K_{AVR}=0.6$ に固定し、定数 T_{AVR} を変化させたPSCAD/EMTDCによる瞬時値解析を実施し、与えられた条件である電圧指令値3%のStep応答にて、キャパシティブ動作でもリアクティブ動作でも動作応答時間仕様50ms以下を満たすよう T_{AVR} を求め、結果 $T_{AVR}=0.0025$ とする。このとき、系統モデルは、理想電圧源+SCR相当のリアクトルとし、応答時間が最も遅くなる最大SCR=9.1相当とし、スローブリアクタンスゲインは設計値として $K_{SLOPE}=0$ とした。最後に、Step応答時の電圧フィードバックの脈動が小さくなるよう比例ゲイン K_{AVR} を決め、 $K_{AVR}=1.0$ となった。以上の設計により、 $T_{AVR}=0.0025$ 、 $K_{AVR}=1.0$ を得る。

図2-9に $T_{AVR}=0.0025$ 、 $K_{AVR}=1.0$ にて実施したPSCAD/EMTDC解析によるStep応答波形の一例を示す。電圧指令値を1.0puから0.97puにStep変化させたとき、最終値までの変化幅の90%への到達時間は43.5msとなり、要求仕様時間50msを満足している。

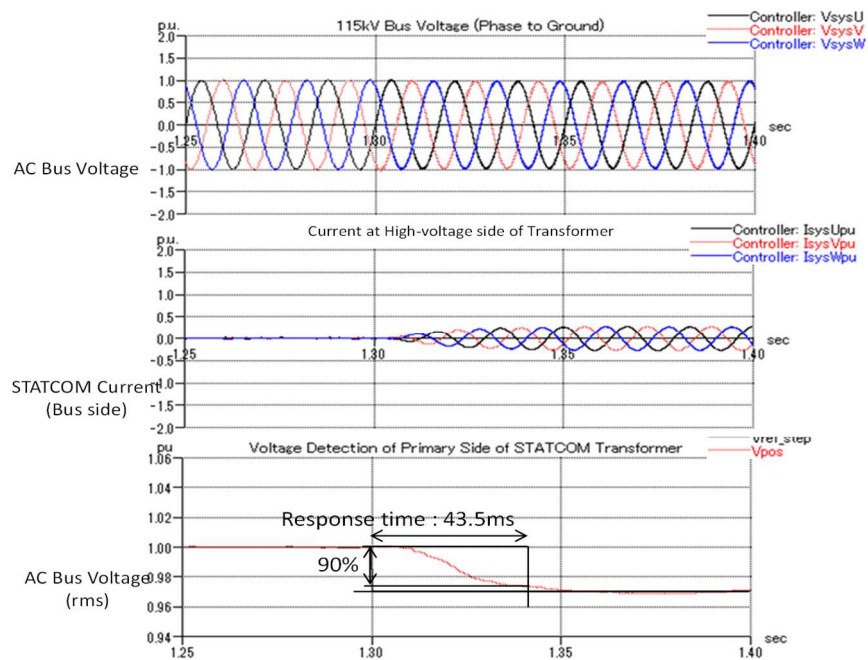


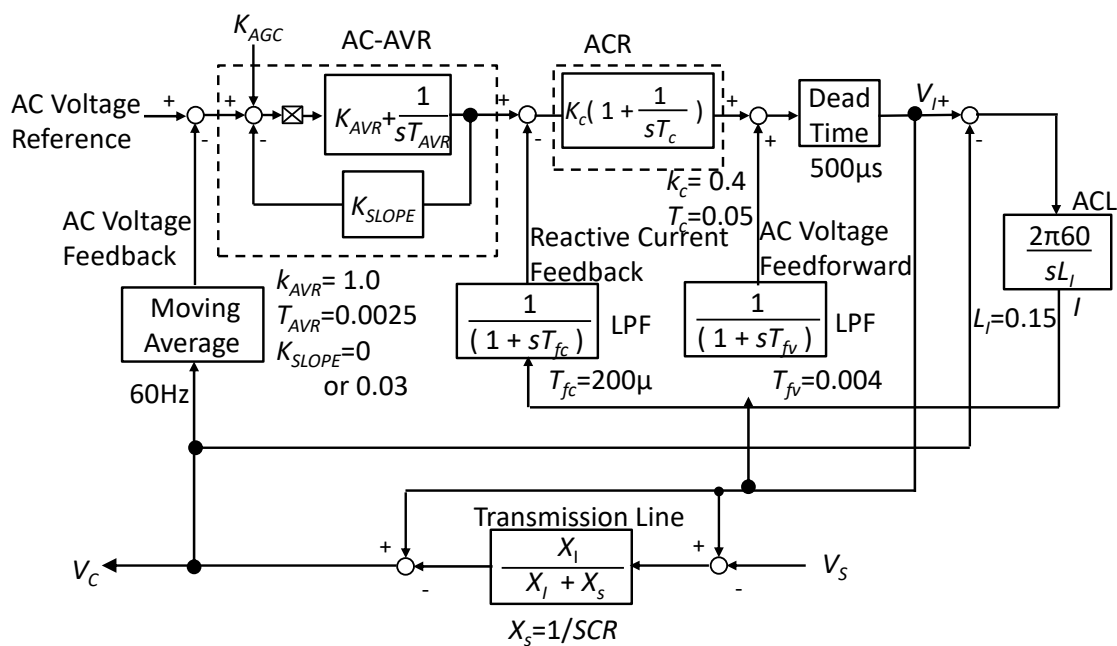
図 2 - 9 Step 応答時の AC-AVR の応答波形

2.3.3 AGC の検討

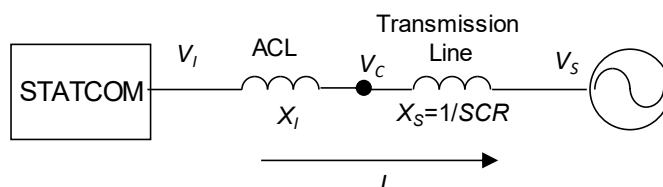
緊急の運用制約や、将来の系統構成変更等、系統条件の変化により SCR が非常に小さい場合に備え、以下に不安定を検出し自動的に AC-AVR を調整できる AGC を検討する。

まず、不安定現象を解析するため、MATLAB/SIMULNK を用いて固有値解析を実施する。解析モデルを図 2-10 に示す。本解析モデルでは表現していないが、実装置の制御系は 3 相信号を取り込んだのち、3 相／2 相変換にて有効成分と無効成分に分離した dq 軸上で制御している。dq 軸上の制御系は非干渉化されているため、系統電圧制御（無効電流制御）を直流コンデンサ制御（有効電流制御）と独立して扱うことができる。従って、図 2-10 の解析モデルでは図 2-5 に示した制御ブロックのうち、無効成分に関するブロックのみを取り出し線形化した。

図 2 - 5 の制御ブロックのうち、破線内に示した直流バランス制御系は MMC 方式固有のものである。この直流バランス制御系のうち循環電流制御については、零相成分の制御であ



(a) 解析モデルブロック図



(b) 電気回路モデル

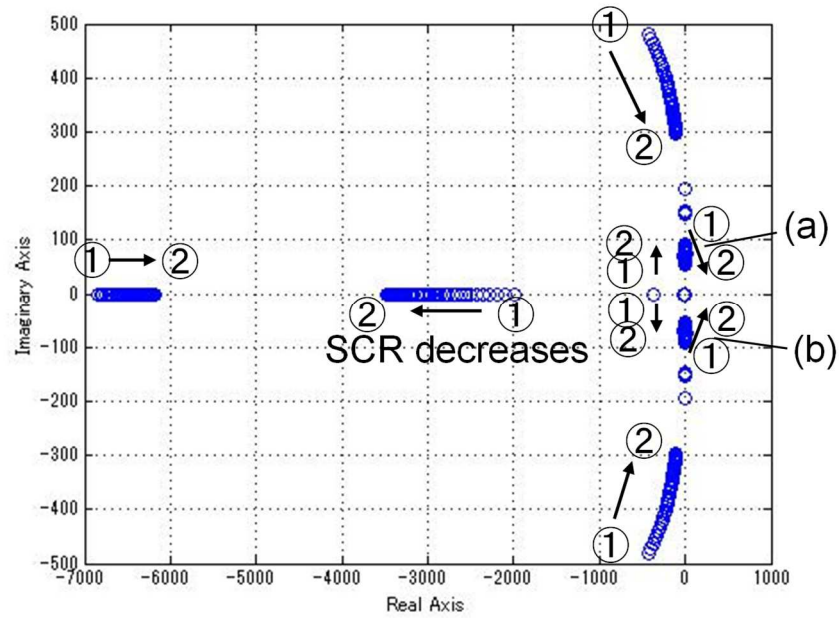
図 2 - 10 AC-AVR 固有値解析用モデルブロック図

るので系統電圧制御系に影響なく非干渉である。また、逆相電流指令についても、系統電圧制御にて逆相成分を除去したのち、正相電圧実効値のみを取り出し制御対象としていることにより系統電圧制御系と非干渉化である。すなわち、図 2 - 5 に示した制御方式を採用したことにより、MMC 方式固有の直流バランス制御を系統電圧制御系と非干渉化でき、図 2 - 10 の解析モデルにて MMC 方式 STATCOM の系統電圧制御系の解析を行うことができると考えられる。

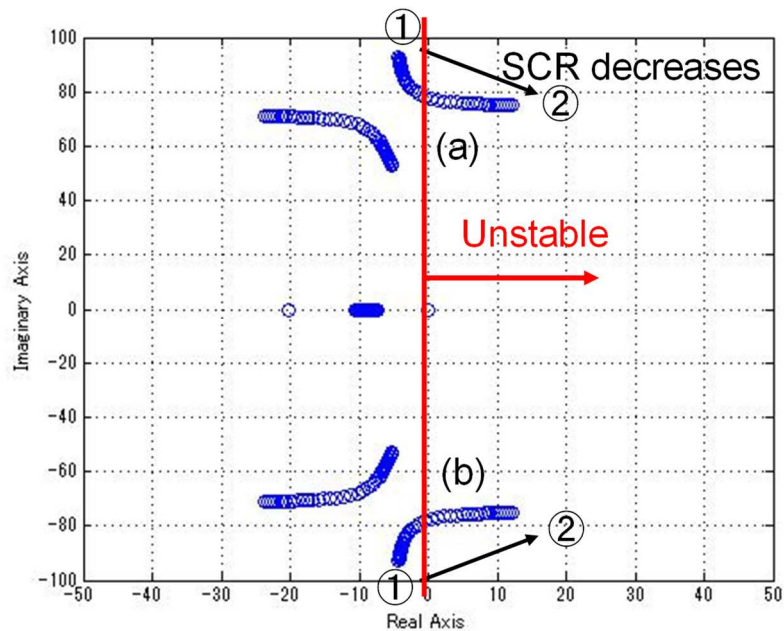
加えて、装置に合わせて、検出器遅れ時間を一次遅れブロックにて、フィードバック信号の取り込みからデジタル演算を経て PWM により電圧出力するまでの演算無駄時間を無駄時間ブロックにて、モデル化した。なお、AC-AVR の PI 制御器と ACR の PI 制御器の構成が異なっているのは、AC-AVR の制御ブロックを従来から用いてきた SVC の制御ブロックと同一とするためである。制御対象の特性が既知である ACR と異なり、AC-AVR の PI 制御の定数は、系統状態に応じて現地調整する可能性がある。その際、本 AC-AVR ブロックは比例項のゲイン K_{AVR} と積分項のゲインの逆数 T_{AVR} が独立して変更可能であるという利点がある。

図 2 - 11 に固有値解析結果を示す。SCR を 9.1 から $1/5$ 倍の 1.8 に変化させると、各固有値は①から②に変化する。このうち(a) (b)の固有値実軸成分が正となり、不安定となることがわかる。

そこで、AC-AVR が不安定になった場合に、不安定動作を検出し、AC-AVR を安定化する AGC



(a) 固有値全体



(b) ゼロ点付近拡大

図 2 - 11 AC-AVR の固有値解析結果

が必要である。AGCの原理は、AC-AVRが不安定になった場合AC-AVRの出力に振動成分が発生することに着目し、不安定成分の抽出手段を検出方式とし、AC-AVRの安定化には、AC-AVRのPI制御器入力信号を K_{AGC} 倍に下げる方式とする。図2-12にAGCのブロック図を示す。まず、AC-AVRの出力信号より、BPF(Band Pass Filter)にて不安定発生時の振動成分を抽出する。BPFの通過角周波数は基本波周波数より低い振動成分を抽出できるよう、50rad/sから200rad/sとする。後段のDivergence Detectionは、閾値0.02pu以上の入力検出時間1ms以上続くと不安定検出信号を出力する構成であり、BPFを通過した振動成分のピークが0.02pu以上かつ1ms以上となるたびに K_{AGC} 変更信号を出力する。このことにより、図2-6に示したAC-AVRのPI制御器入力信号が K_{AGC} 倍に下げられる。本AGCでは、上記のとおり不安定に起因する振動が続く限り、閾値を超えるたびに K_{AGC} 変更信号が出力されるため、 K_{AGC} の変更は、0.15刻みで5段階、最終値0.25まで段階的に下げることとした。安定化に成功し、閾値0.02puかつ継続時間1msを超える振動が検出されなくなると不安定検出信号を出力しなくなるので、 K_{AGC} は下げ止まる。

なお、本制御では、系統運用上の要請より K_{AGC} の復帰(Reset)は手動もしくは毎日の設定時刻での復帰とする。復帰時点で系統条件が改善されていない可能性があるが、その場合はAGCによって再び K_{AGC} が下げられて安定化される。系統状態を自動で推定して K_{AGC} を最適化する制御の検討が望まれ、今後の課題である。

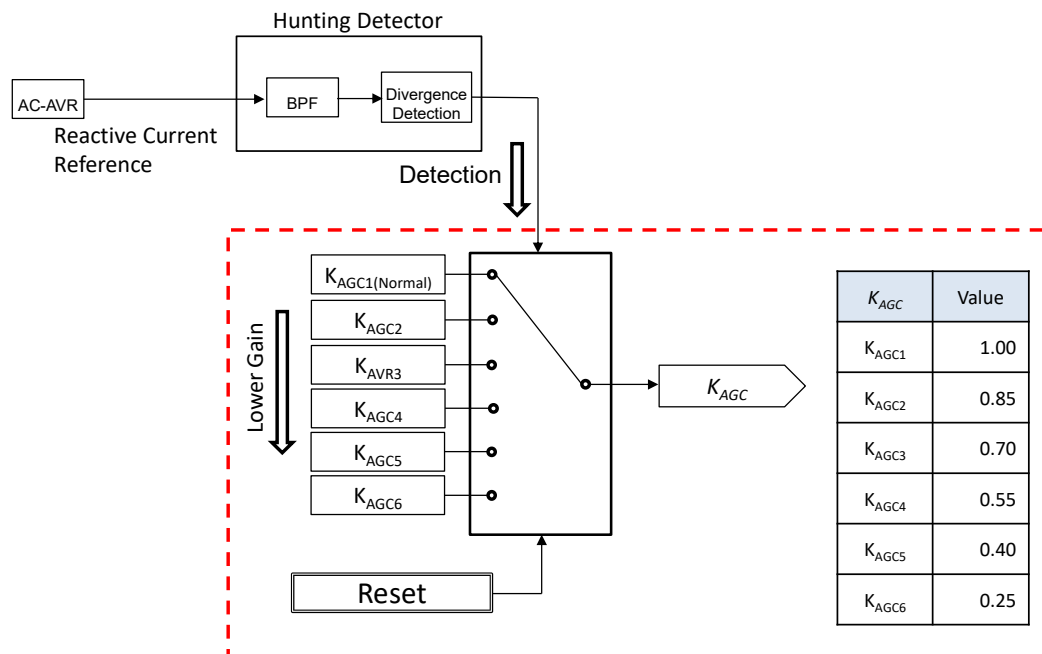


図2-12 検討AGCブロック図

2.3.4 待機時間制御の検討

事故等にて系統電圧が設計レベルより低下すると、STATCOM は一旦ゲートブロックし待機モードに移行する。系統の無電圧時間が長く続くと、直流コンデンサが放電されて SM への給電が停止し、制御基板が停止する。ここまで至ると SM の状態監視ならびに制御ができなくなるため、それ以前に STATCOM の遮断器を開放し停止モード(System Halt)に移行し遮断器を開放(CB Open)する必要がある。

停止モードに移行するまでの、最も簡便な待機時間制御方法は、図 2-13 に示したように、待機時間モニター(Time Monitor)にて予め設定された一定待機時間までゲートブロックして待機する方法である。しかしながらこの方式の場合、設定タイマー値は SM 制御基板が停止するまでの最短時間以下とする必要があり、1-3 秒が限界である。また一旦停止モードに移行すると、直流コンデンサの放電完了を待つ必要があり、再起動に時間を要する。

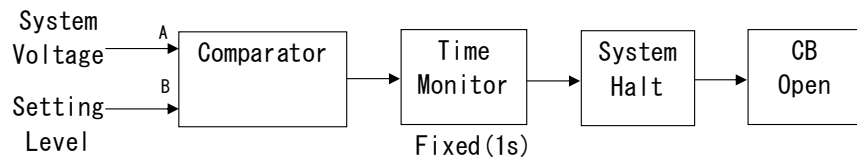


図 2-13 従来の待機時間制御方式のブロック図

一方、系統構成によるものの、系統事故発生後事故除去の遮断器動作で単独系統となるケースを考えると、再開路で復電するまでは STATCOM が停止モードに移行せずゲートブロック待機し、復電後ただちにゲートデブロックして系統安定化に寄与することが望まれる。

そこで、SM 直流電圧の最低値を監視することにより、待機時間を極力延長可能とする制御方式を検討する。図 2-14 に制御方式のブロック図を示す。この制御方式では、SM の直流電圧を監視するとともに、その最低値を選択する。選択された最低値は、設計上設定された SM の動作可能電圧レベルと比較され、動作可能電圧レベル以上の場合は待機可能と判断し、停止モードへの移行を不許可にする。待機時間を延長するだけの目的であれば、動作可能電圧か否かの判定と系統電圧低下の論理積で実現可能であるが、系統運用にて従来のタ

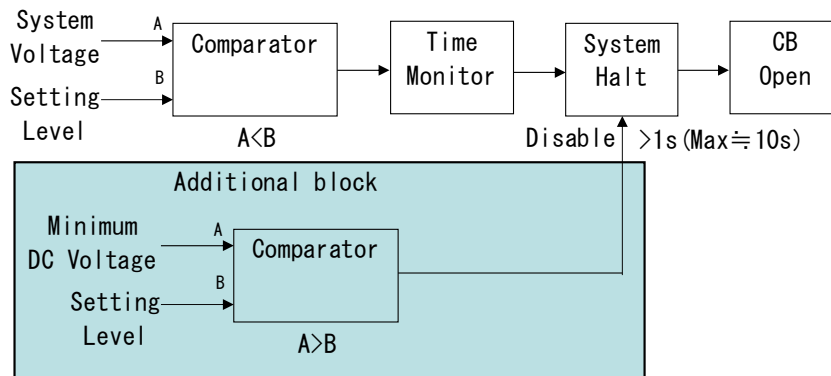


図 2-14 本検討の待機時間制御方式のブロック図

イマー方式との切り替えが必要であるため、本方式とする。本制御により、事故条件によるものの、待機可能時間を10秒程度まで延長することができる。

2.4 リアルタイムシミュレータによる制御系確認試験

2.4.1 リアルタイムシミュレータ装置

装置の実用化において、実系統への導入前に、製作した制御装置をそのままの形でかつ主回路に電圧、電流を加えることなく試験することは極めて有益である。そこで、本研究ではリアルタイムシミュレータを用いてSTATCOM主回路ならびに実系統を模擬することとした。すなわち、STATCOM主回路については複数SMの主回路動作が同時かつ瞬時に可能なRTDS Technologies社のMMC Support Unitを利用して構築し、実系統については、RTDS Technologies社のRTDSシミュレータを用いて構築した。リアルタイムシミュレータ試験では、AC-AVRのStep応答、AGC動作確認、待機時間制御の動作確認、FIDVR発生時の系統電圧安定化効果確認試験を実施する。

図2-15にリアルタイムシミュレータ試験環境の全体構成図を示す。装置は、(1)RTDS Technologies社のRTDS Simulatorとその上に構築した詳細系統モデル(Power System Model)ならびに変電所モデル(Substation Model)、(2)MMC Support Unit上に構築したMMC方式STATCOM主回路モデル(STATCOM)、(3)制御装置(VSCC(Voltage-Sourced Converter Controller)), LCP(Local Control Panel), HMI(Human Machine Interface)),

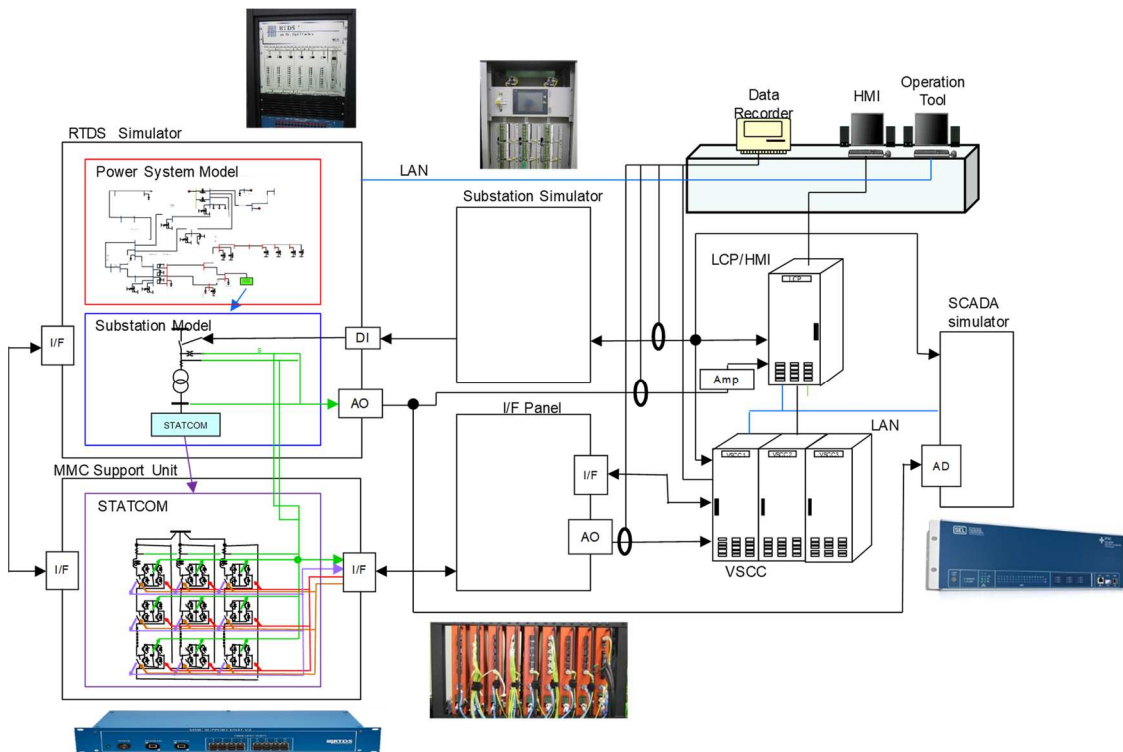


図 2 - 15 リアルタイムシミュレータ試験環境全体構成図



図 2 - 16 リアルタイムシミュレータのハウスマシン

(4)SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)シミュレータ, (5)変電所シミュレータ(Substation Simulator) , (6) I/F(InterFace)盤で構成される。なお, 工場出荷後も現地試験のリハーサルや現地事象の再現試験が実施できるよう, 工場内にハウスマシンを構築している。図 2 - 16 に構築したハウスマシンを示す。(1) - (6)の詳細は以下のとおりである。

(1) 詳細系統モデルならびに変電所モデル

詳細系統モデルならびに変電所の電気回路モデルは RTDS 社のリアルタイムデジタルシミュレータである RTDS シミュレータにて模擬する。RTDS シミュレータは複数の DSP の並列処理手法を用いて電力系統のリアルタイムシミュレーションを行うデジタルシミュレータ装置である^[7]。専用のモデル作成ソフト RSCAD にて, Park モデルの発電機, 分布定数線路, 飽和特性を持った変圧器, L, R, C 回路, 線路遮断器等を含む三相瞬時値ベースの系統モデルが作成可能である。本研究では, 装置導入系統の詳細系統モデル, 装置設置変電所周辺の電気回路, 装置設置変電所周辺の負荷を模擬する。なお, 発電機については, 定数入手し詳細に模擬することも可能であるが, 本研究では, 発電機は STATCOM 接続系統から見て上位の 500kV および 230kV 系統に接続され, STATCOM からは無限大母線とみなすことができるため, 三相理想電圧源にて模擬する。

(2) MMC 方式 STATCOM 主回路モデル

MMC STATCOM の主回路は RTDS 社の MMC Support Unit を用いて模擬する。MMC Support Unit は FPGA を用いた並列演算により, 1 ユニットあたり二相もしくは 2 アーム分, 最大直

列数 512 の SM からなる MMC 主回路を模擬することができる^[8]。MMC Support Unit と RTDS シミュレータは専用の光ファイバで接続され、RTDS シミュレータとともにリアルタイムシミュレーションが可能である。本研究においては、図 2 - 4 上のアームリアクトルを含むデルタ結線内主回路を電気回路で模擬する。SM については、図 1 - 6(b)に示した IGBT ならびに逆並列ダイオードからなるフルブリッジセル、直流コンデンサ、バイパススイッチ、直流コンデンサの放電抵抗が模擬可能である。IGBT については on 回路と off 回路で構成されるスイッチ回路を切り替える方式としており、この方式により $2\mu s$ での微小演算刻みを可能としており、スイッチング動作を行う主回路の動作を精度よく模擬することができる^[9]。

(3) 制御装置

シミュレータ試験に際しては、実用化装置に適用される実際の制御盤を使用する。変換器制御盤 VSCC(Voltage-Sourced Converter Controller)は、制御・保護に使用する計測信号の入力装置、他の機器とのインターフェース装置、設定・調整用のタッチディスプレイ、STATCOM 変換器制御・保護を実行するための DSP(digital signal processor)演算装置、を備えた盤であり、図 2 - 5 に示した MMC 方式 STATCOM の制御ブロックを実行する。LCP(Local Control Panel)は信号入出力回路、専用の演算ユニットを備え、主に変換器の起動・停止・保護に関するシーケンス制御を行う装置で、キーボード、マウス、ディスプレイを備えた、状態監視ならびに操作を行う HMI(Human Machine Interface)とともに一面の盤に収められている。

(4) SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)シミュレータ

VSCC ならびに LCP/HMI は電力会社の SCADA によって変電所監視ならびに遠隔操作が可能である必要がある。SCADA シミュレータは、変電所内の信号を集約し電力会社に伝送するとともに、遠隔操作信号を電力会社から受け、変電所内機器に伝達する機能を有している。SEL 社のリアルタイム自動計測・操作・制御装置 RTAC(Real-Time Automation Controller)を用いて構築する。

(5) 変電所シミュレータ(Substation Simulator)

変電所シミュレータは、変電所内の機器、例えば遮断器や断路器の動作を模擬する装置で、PLC(Programmable Logic Controller)にて構成した。変電所ごとの柔軟性を持たせるため、プログラムにより機器構成・設定が変更可能である。この盤からの機器動作信号は RTDS シミュレータに伝送され、模擬電気回路上での開閉動作は RTDS シミュレータ内にて模擬される。

(6) I/F(InterFace)盤

MMC Support Unit は Aurora プロトコルにて通信する仕様であるのに対し、製品制御盤は製品 SM の通信・制御基板と独自プロトコルで通信する。そこで MMC Support Unit と製品制御盤との間でプロトコル変換を行う信号変換装置が必要である。また、信号変換には高速同時演算処理が必要であり、FPGA を用いたロジック回路にて構築する。図 2 - 17 に主となる変換信号のブロック図を示す。

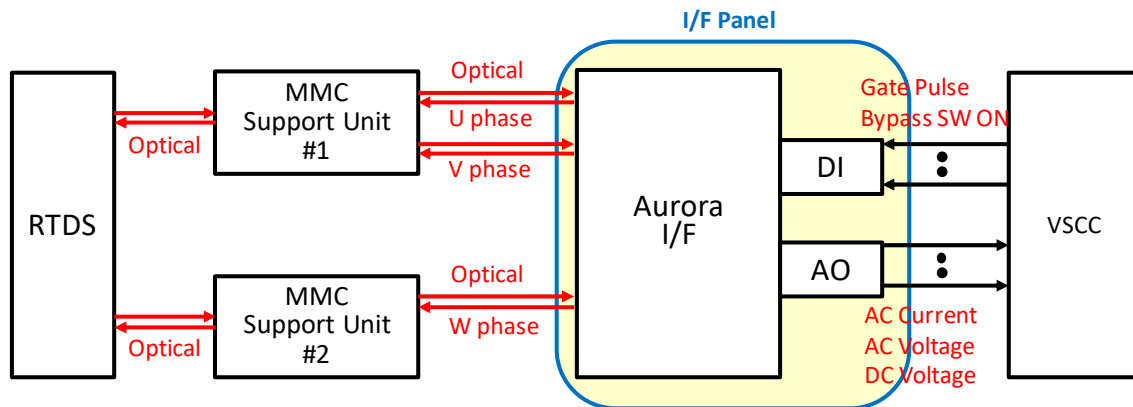


図 2 - 17 I/F(InterFace)盤での信号変換ブロック図

(1) - (6) の構成により、装置の出荷試験時には装置として出荷される VSCC, LCP/HMI を試験環境に組み込み、(1) RTDS シミュレータ上に詳細系統モデルを、(2) MMC Support Unit 上に装置と同等の主回路を、(4) SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) シミュレータならびに(5)変電所シミュレータ(Substation Simulator)に装置を設置する変電所と同等の環境を構築することができ、現地とほぼ同等の状態にて工場試験を実施できる。

2.4.2 Step 応答試験

AC-AVR の特性を確認するため、Step 応答試験を行った。系統モデルは、最大 $SCR=9.1$ を模擬したリアクトル+電圧源とし、PSCAD/EMTDC 瞬時値解析と同様、電圧指令値を 1.0pu から 0.97pu へと 3%変化させる Step 応答とする。本試験では系統運用上の要求により、スロープリアクタンスは $K_{SLOPE}=0.03$ とした。 $K_{SLOPE}=0$ の場合と比べると、 $K_{SLOPE}=0.03$ とすると最終値への変化幅が小さくなることにより到達時間は短くなると考えられる。

結果波形を図 2 - 18 に示す。最終値への変化幅の 90%への到達時間は 36ms となり、要求仕様 50ms を満足した。 $K_{SLOPE}=0.03$ としたことで、予想のとおり PSCAD/EMTDC 瞬時値解析結果の 43.5ms と比べると短くなる。

また、図 2 - 19 に示したスロープリアクタンスの設計より、連系点電圧を V 、STATCOM

第2章 MMC方式STATCOMによる系統安定化制御

の無効電流出力を I とすると，STATCOM の出力特性については（式 2 - 4），電力系統の電圧特性については（式 2 - 5） のとおりとなる。

$$V = V_{ref} + K_{SLOPE} \cdot I \quad (\text{式 2 - 4})$$

$$V = V_0 - \frac{I}{SCR} \quad (\text{式 2 - 5})$$

（式 2 - 4） ならびに（式 2 - 5） より， SCR を求める式は（式 2 - 6），運転点の V を求める式は（式 2 - 7） となる。

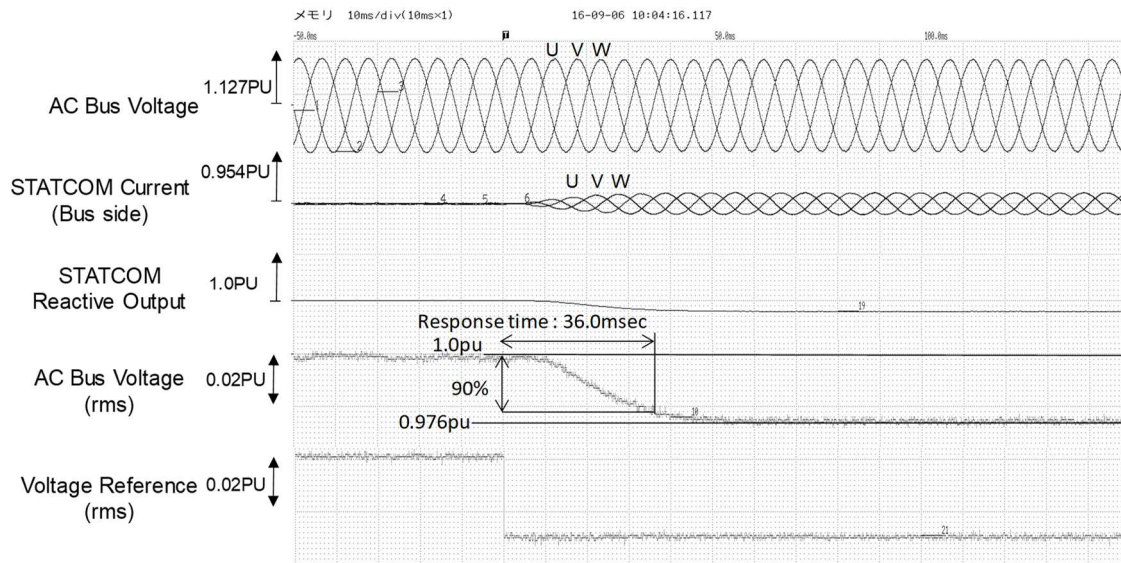


図 2 - 18 リアルタイムシミュレータ試験での Step 応答波形

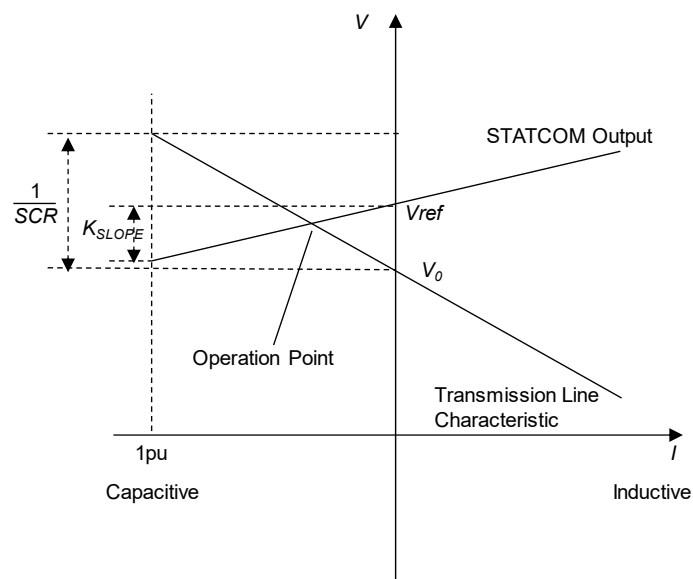


図 2 - 19 スロープリアクタンスの設計方法

$$SCR = \frac{1}{K_{SLOPE}(V_0 - V)}(V - V_{ref}) \quad (\text{式 2 - 6})$$

$$V = \frac{1}{1 + K_{SLOPE} \cdot SCR}(V_{ref} + K_{SLOPE} \cdot SCR \cdot V_0) \quad (\text{式 2 - 7})$$

ここで、 $V_0=1.0$ 、 $V_{ref}=0.97$ 、 $K_{SLOPE}=0.03$ 、 $SCR=9.1$ より (式 2 - 7) を用いると $V=0.976$ が得られるが、図 2 - 21 にて、最終値は $V=0.976$ であるので、よい一致が得られる。

2.4.3 AGC 確認試験

AGC の効果を確認するため、系統モデルの SCR を最大 $SCR=9.1$ から $1/5$ 倍の 1.8 に変化させる試験を行った。系統モデルは、図 2 - 20 に示したとおり SCR を模擬したリアクトル+電圧源とする。

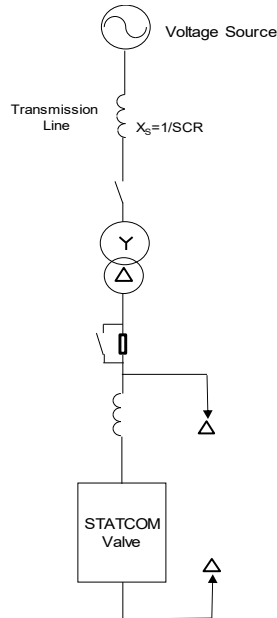


図 2 - 20 AGC 確認試験のリアルタイムシミュレータ上での回路構成図

結果波形を図 2 - 21 に示す。 SCR を 1.8 に変化させた後、AC-AVR が不安定となり STATCOM の無効電力出力に振動が発生し、結果として系統電圧を振動させている。図 2 - 21 の波形前半では、 K_{AGC} が変更されていないため、振動が徐々に拡大している。すなわち、このまま K_{AGC} を変更せずに運転を継続すると、不安定現象は収束せず系統電圧の振動が続くことが予想される。一方、図 2 - 21 の波形後半では、AGC が AC-AVR 出力の振動を検出し、 K_{AGC} を段階的に下げたことにより、最終的に $K_{AGC} = 0.25$ を出力し、ゲインを 0.25 倍に下げて安定化に成功している。

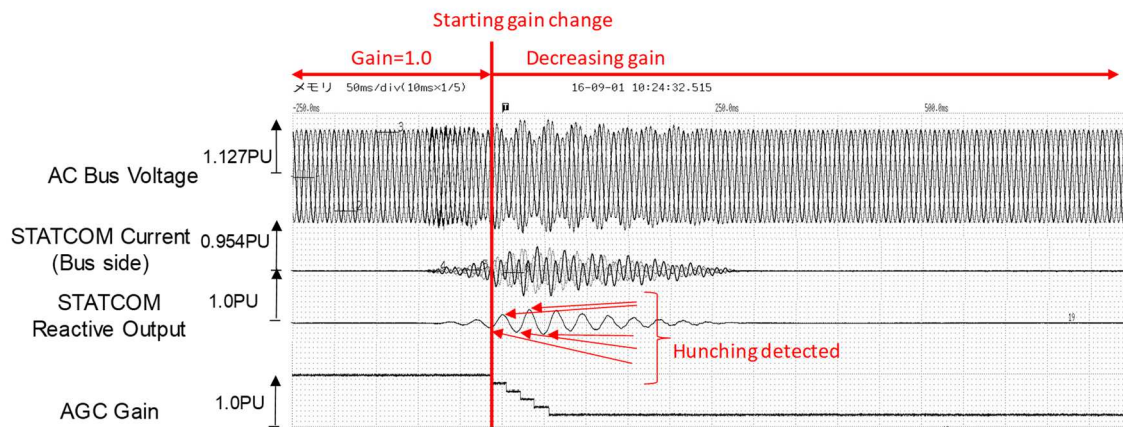
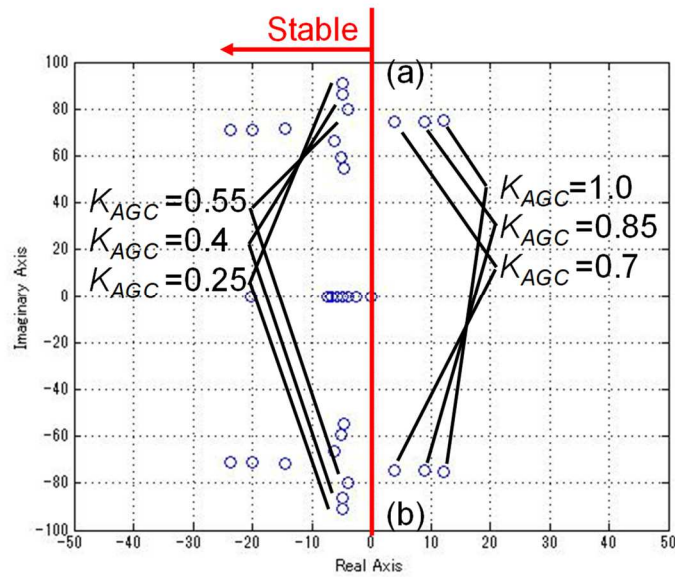


図 2 - 21 AGC 確認リアルタイムシミュレータ試験波形

図 2 - 22 は、図 2 - 10 に示した解析モデルを用いて、本試験での条件 $SCR=1.8$ にて、 K_{AGC} を 1.0 倍から 0.25 倍に変化させた固有値解析の結果である。図 2 - 22 より、 $K_{AGC} = 0.55$ 以下で固有値実軸の極性が負に転じ、安定化できることがわかる。しかしながら、図 2 - 21 の試験結果では、 K_{AGC} が 0.25 倍まで下がっている。図 2 - 12 の制御方式では、振動のピーク付近で閾値を超えていると振動ごとに K_{AGC} を下げ続けるアルゴリズムになっているため、安定化による振動の収束より早く K_{AGC} が下がっていると考えられる。より安定な方向への動作であり、実運用では問題ない。図 2 - 21 より、 $SCR=1.8$ という非常に厳しい系統条件でも、最小値 0.25 まで 5 段階に K_{AGC} を変化させることで適切に AC-AVR を安定化できると考えられる。しかしながら、検出ロジックや検出時間の見直しによって最適なゲイン倍率を得ることは今後の課題である。また、図 2 - 21 より、STATCOM 出力振動の角周波数は約 190rad/s であるのに対し、図 2 - 22 にて $K_{AGC} = 1.0$ の時の角周波数は約 80rad/s なので、完全な一致は見られていない。固有値解析のモデルの精度向上も今後の課題である。

図 2 - 22 K_{AGC} と AC-AVR 制御系の固有値解析結果

2.4.4 待機時間制御確認試験

待機時間制御の効果の確認試験は、図 2 - 23 に示した、実システムを模擬した詳細システムモデルにて行う。詳細システムモデルでは、最上位 500kV の無限大母線から、230kV、115kV へと電圧等級を下げて末端の負荷系統へと系統が分岐していく。STATCOM は 1 回線になった 115kV 系統上に設置され、この系統上で Fault Point 1 にて事故が発生し、系統上の遮断器が開放されると単独系統に移行し無電圧になる。通常は約 10 秒で再閉路され、復電する。

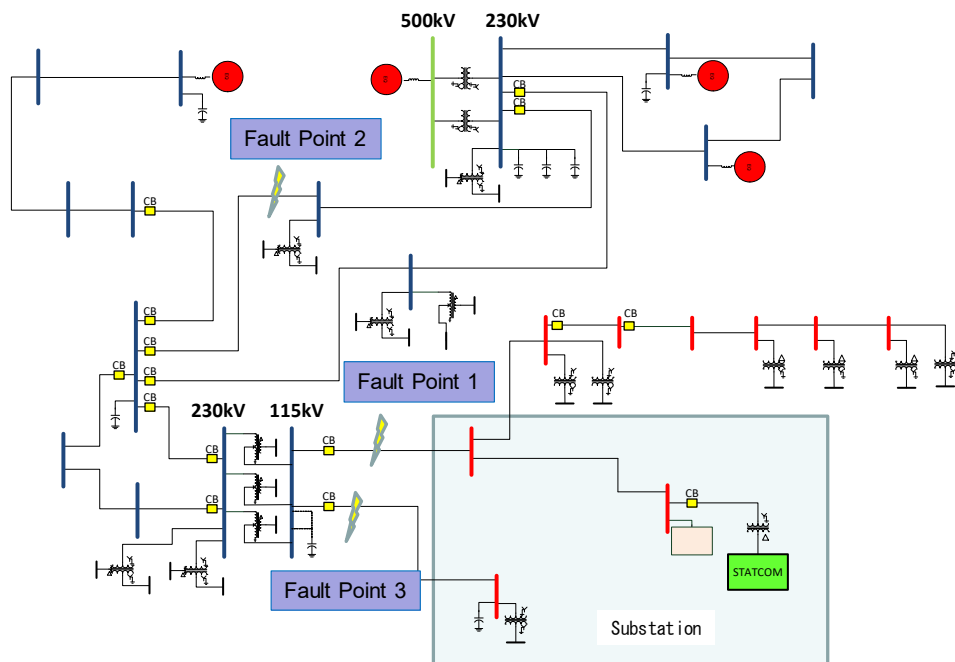


図 2 - 23 シミュレータ試験用詳細システムモデル

図2-24は図2-13に対応した、従来の待機時間制御を用いた場合の波形である。無電圧移行後1秒でタイマー動作によりSTATCOMは完全停止し、約10秒後に再閉路により復電しても再起動しない。対して、図2-25は、図2-14に対応した、提案待機時間制御を適用した場合の波形である。無電圧移行後約10秒で再閉路に成功し復電するとともに、STATCOMが正常に運転再開できることが確認できる。

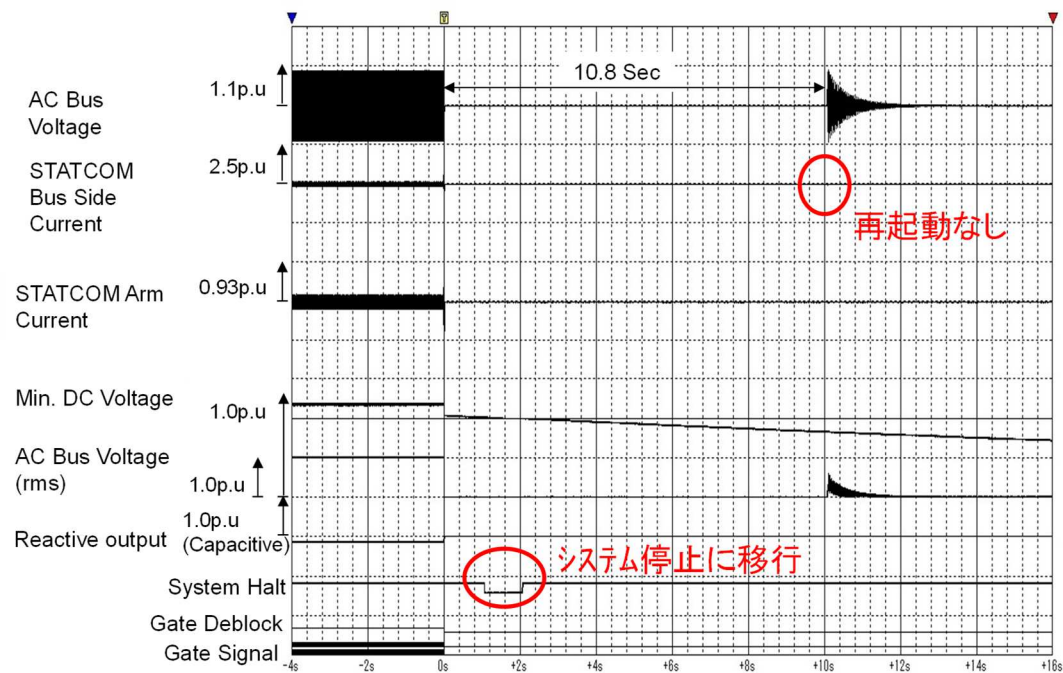


図2-24 従来の待機制御方式のシミュレータ試験波形

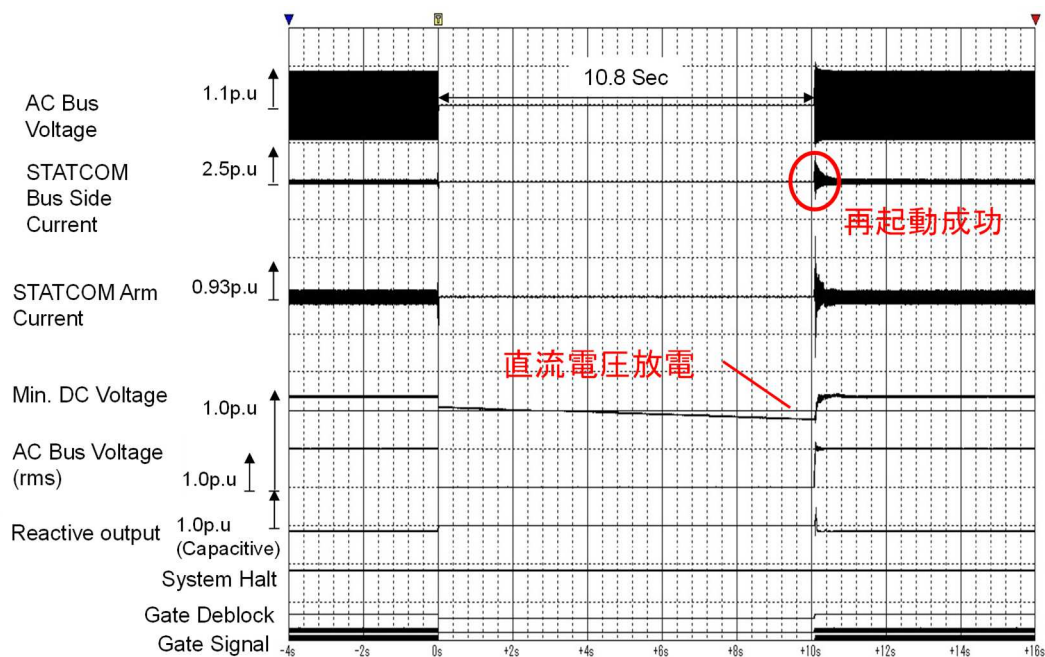


図 2 - 25 検討待機制御方式のシミュレータ試験波形

2.4.5 FIDVR 発生時の系統安定化効果確認試験

以上述べた制御系全体の動作確認と FIDVR 発生時の系統安定化効果を確認するため、図 2 - 23 の Fault Point 2 にて 3LG 事故を発生し、STATCOM の有無による系統電圧の回復特性の比較試験を行った。誘導電動機負荷は STATCOM 設置点より末端系統上とし、容量は STATCOM 定格容量の 0.6pu とする。

図 2 - 26 に STATCOM なしの場合の波形、図 2 - 27 に STATCOM ありの場合の波形を示す。STATCOM なしの場合、誘導電動機負荷の影響により、系統電圧の復帰に 20 秒程度必要なのに対し、STATCOM ありの場合、1 秒以内に 100%に復帰しており、PJM ガイドラインの 2.5 秒以内に 70%復帰の条件を満たすことが確認できる。

第2章 MMC方式STATCOMによる系統安定化制御

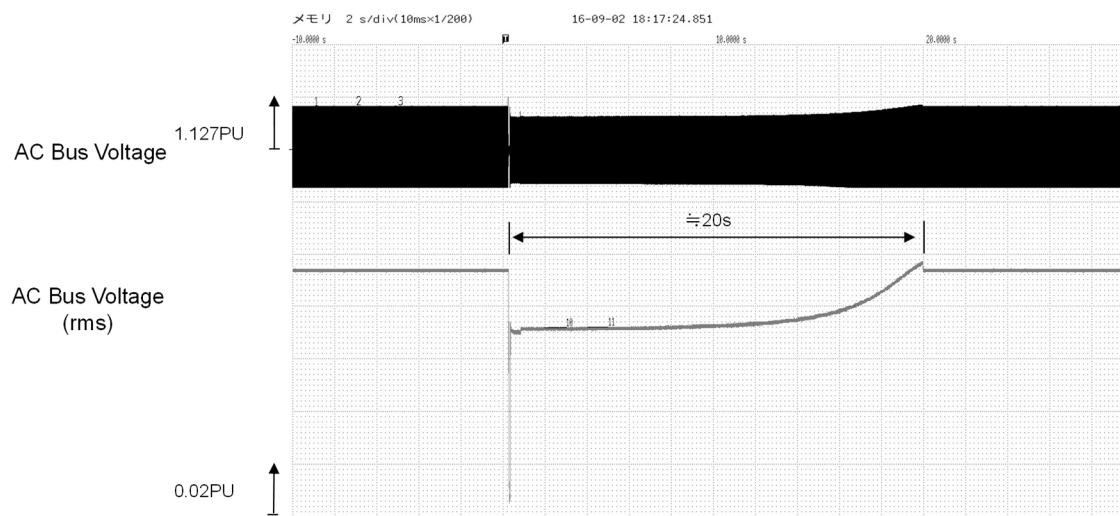


図 2 - 26 STATCOM なしの場合の 3LG 事故発生時シミュレータ試験波形

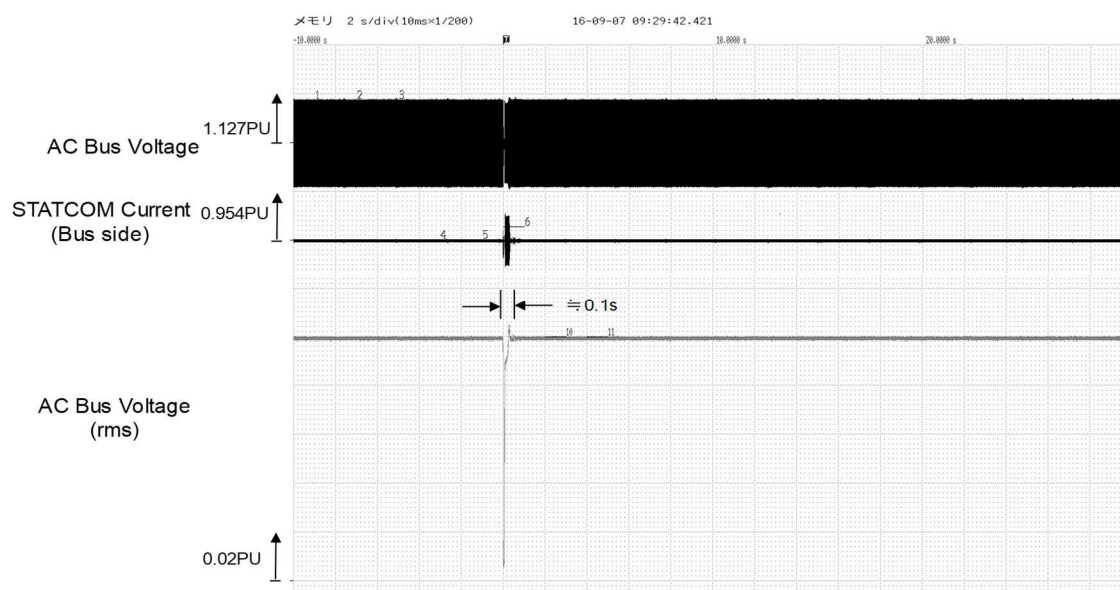


図 2 - 27 STATCOM ありの場合の 3LG 事故発生時シミュレータ試験波形

2.5 実用化装置波形による系統安定化効果の確認

2.5.1 装置構成

図 2 - 28 に実用化装置の構成図を示す。STATCOM 主回路バルブは変換器用変圧器を介して電力系統と接続されている。変圧器二次側には初期充電抵抗器とバイパススイッチが接続され、初期充電時には初期充電抵抗器を介して SM 直流コンデンサへの突入電流を抑制し、直流コンデンサが所定の電圧に充電されるとバイパススイッチによりバイパスされる。SM は光ファイバにて変換器制御盤(VSCC)と接続され、VSCC は上位制御盤(LCP)／操作・監視盤(HMI)と接続され、保護・操作・シーケンス制御される。また SM 主回路素子の IGBT は、イオン交換により低導電率に管理された循環冷却水にて冷却される。

図 2 - 29 に装置の設置された変電所の航空写真を示す。図 2 - 29 下部が交流系統との接続点で、上部左側が変換器ならびに制御装置の設置されている装置建屋である。なお、図 2 - 29 は変圧器据え付け前の写真であるため変圧器が写っていないが赤色の枠の中央やや右下の空きスペースに設置されている。

図 2 - 30 は変換器・制御建屋ならびに屋外設置機器のわかる、変電所斜め上からの写真である。アームリアクトル(Arm Reactor)、初期充電抵抗器(Initial Charge Resistor)は屋外交流機器エリアに配置され、建屋横に屋外熱交換器(Heat Exchanger)が配置されている。SM 主回路素子は、ポンプ装置(Pump Skid)を用いて循環された冷却水にて冷却され、温められた冷却水の熱は屋外熱交換器にて気中に放熱される。

装置建屋は制御室(Control Room)と変換器室(Valve Room)から構成される。図 2 - 31 に変換器室に設置された変換器バルブを、図 2 - 32 に制御室に設置された制御盤を示す。

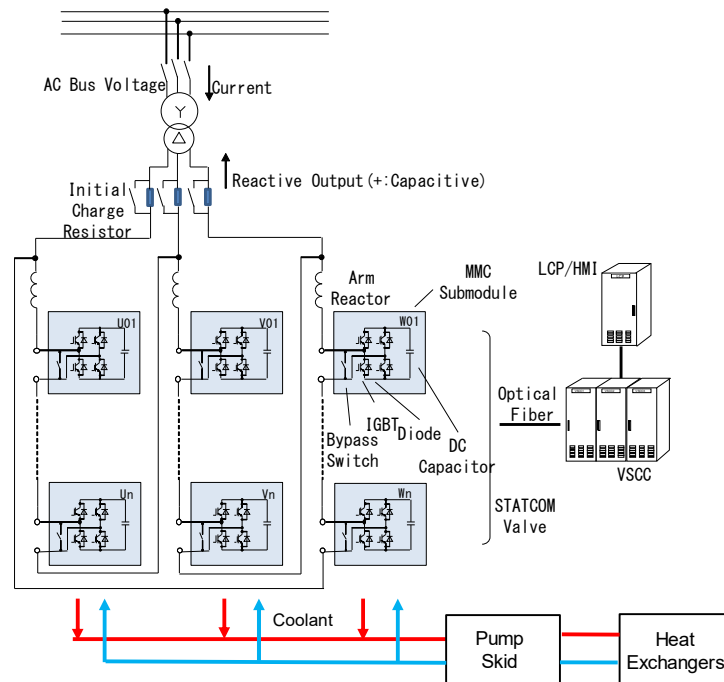
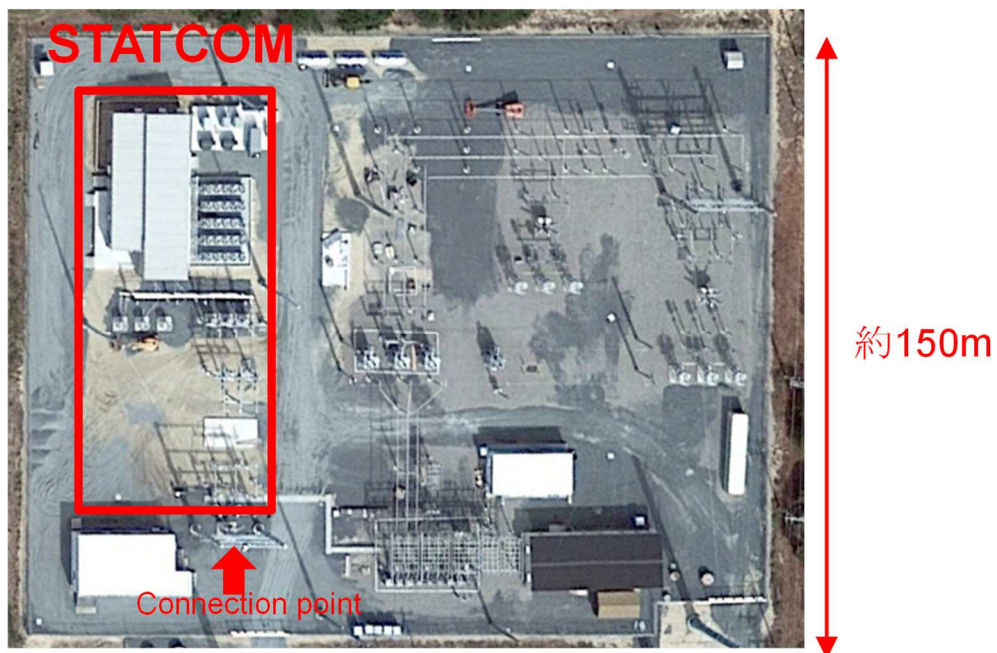


図 2 - 28 装置構成図



出典：Google Map

図 2 - 29 装置設置変電所の航空写真

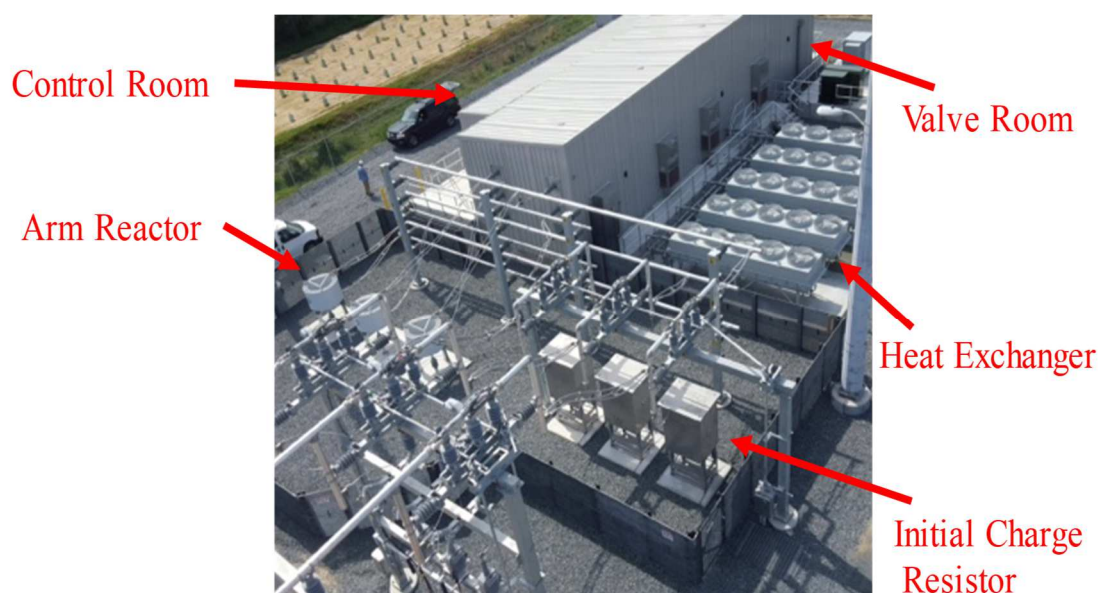


図 2 - 30 変換器・制御建屋ならびに屋外設置機器

2.5 実用化装置波形による系統安定化効果の確認



図 2 - 31 制御室内の制御盤



図 2 - 32 変換器室内変換器バルブ

また，図 2 - 33 にバルブを構成する SM を，図 2 - 34 に SM 内主回路を構成する IGBT 素子を示す。SM 前部にはバイパススイッチ(Bypass Switch)を，上部には IGBT 素子のゲート制御回路(Gate Logic)を，後部には直流コンデンサ(DC-Capacitor)を配置している。SM 故障時はバイパススイッチにて IGBT 素子をバイパスして運転継続する構成としている。

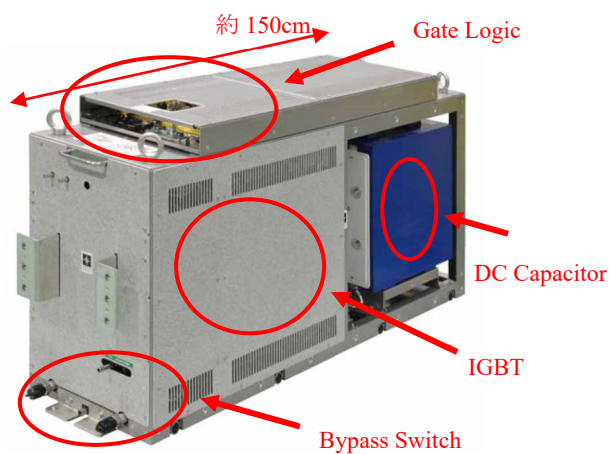


図 2 - 33 サブモジュール



図 2 - 34 IGBT 素子 (4500V, 1200A)

2.5.2 Step 応答試験

STATCOM は設置後、各種試験を経て商用運転開始となる。設置時の現地試験の一環として、AC-AVR 特性を確認するためのステップ応答試験を実施した。PSCAD/EMTDC 瞬時値解析結果、シミュレータ試験結果と比較可能なように、電圧指令値 V_{ref} を 1.02pu から 0.99pu への 3% 変化させた試験を実施した。開始電圧が 1pu より高いのは、試験手順の都合で、0.99pu から 1.02pu への試験実施後に連続して試験を実施したためである。本試験時は $K_{SLOPE}=0.03$ であった。結果波形を図 2 - 35 に示す。最終値までの変化幅の 90%への到達時間は 37ms で、要求仕様 50ms を満足した。また、 $V_0=1.02$, $V_{ref}=0.99$, $K_{SLOPE}=0.03$, 図 2 - 35 より最終値は $V=0.995$ なので、(式 2 - 6) を用いて $SCR=6.7$ となり、最小 SCR での運用であったことがわかる。このことより、PSCAD/EMTDC 解析結果の 43.5ms より早くなっているのは SCR が PSCAD/EMTDC 解析条件と比べ、小さかったためと考える。

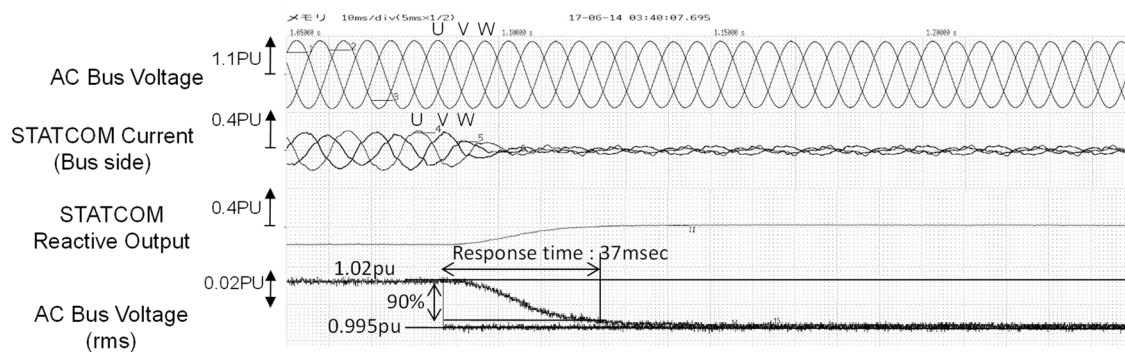


図 2 - 35 現地試験 Step 応答波形

2.5.3 2LS 事故時の系統安定化結果

商用運転開始後、波形記録装置にて、系統事故時の運転波形が採取できた。事故点は図 2 - 23 の Fault Point 3 で、事故種別は V 相－W 相間の 2LS 事故であった。図 2 - 36 に採取波形を示す。2LS 事故発生に伴い系統電圧実効値が 0.75pu 以下まで低下するものの、STATCOM がキャパシティブ無効電力を出力することによって、その後は正相実効値 0.75pu 以上に維持されている。事故除去後は、AC-AVR の応答のため電圧オーバーシュートが発生しているが、約 0.2 秒で 1pu に系統電圧を維持している。このとき、無効電流出力が依然キャパシティブであり、STATCOM の出力によって系統電圧が 1pu 付近に維持され、系統電圧の安定化に寄与していることが確認できる。

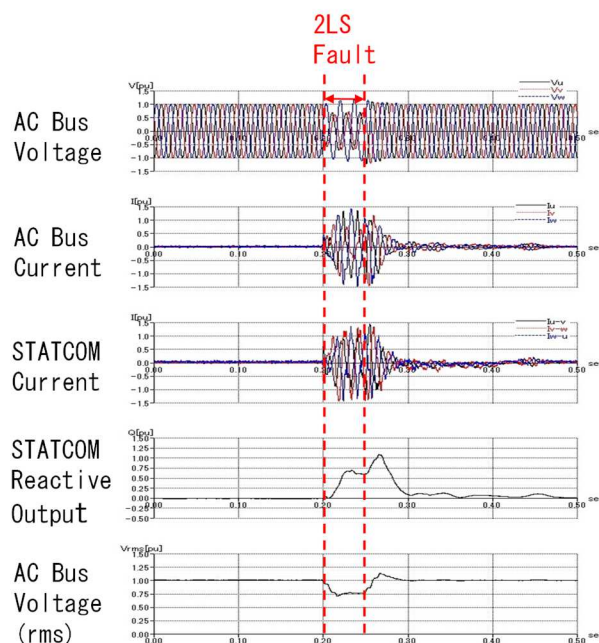


図 2 - 36 現地で採取された 2LS 事故波形

2.6 結言

本章では，MMC方式STATCOMにおける，系統電圧安定化制御について検討し，RTDS シミュレータを用いたリアルタイムシミュレータ試験ならびに実用化装置にて結果を検証した。結果は以下にて要約される。

- (1) AC-AVR について，PSCAD/EMTDC を用いた瞬時値解析にて制御系を設計し，Step 応答にて設計値である応答時間 50ms 以内を確認した。
- (2) AGC について，固有値解析による安定性解析にて SCR 変化時の不安定現象を自動的に解消する制御系を設計し，シミュレータ試験にて，不安定現象の発生と適用効果を確認した。
- (3) AC-AVR 制御系の設計について，MMC方式のSTATCOMにおいても，従来のPWMインバータの場合と同様な無駄時間＋線形システムのモデルで設計可能であることを固有値解析とシミュレータ試験で検証した。
- (4) 待機時間制御について，制御方式を検討し，シミュレータ試験にて 10.8 秒まで待機時間を延長できることを確認した。
- (5) FIDVR について，シミュレータ試験にて STATCOM なしの場合約 20 秒間の電圧低下となるのに対し，STATCOM ありの場合，約 0.1 秒で 100%まで系統電圧を復帰できることを確認した。
- (6) 実系統の 2LS 事故波形にて，一旦 0.75pu 以下に低下するものの，STATCOM の系統電圧安定化制御により，その後の事故中は 0.75pu 以上に，事故除去後は約 0.2 秒で系統電圧を 1pu に維持できることが確認できた。

参考文献

- [1] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Outer_Banks
- [2] PJM Staff Whitepaper, "Baseline Project B2757" (Transmission Expansion Advisory Committee (TEAC) Recommendations to the PJM Board, pp.28 (2017)
- [3] E.V. Larsen, N.W. Miller, S.L. Nilsson, S.R. Lindgren: "Benefits of GTO-based compensation systems for electric utility applications", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 7-4, pp. 2056 - 2064 (1992)
- [4] PJM Manual 14B: "PJM Region Transmission Planning Process", Rev. 46, pp.119 (2018)
- [5] M. McVey: "The STATCOM Solution", R&D World (2018)
- [6] K. Nada, T. Kikuchi, T. Takuno, T. Fujii, R. Uda, T. Sugiyama : "Capacitor Voltage Control of MMC-STATCOM during Unbalanced AC System Fault", IPEC-Niigata 2018, pp. 3578-3583 (2018)
- [7] 稲辺 普人:「リアルタイム瞬時値解析 RTDS の特徴と解析性能」, 電気学会誌, Vol. 122, No. 5, pp. 292-294 (2002)
- [8] 株式会社 J-POWER ビジネスサービスホームページより ,
<https://www.jpbs.co.jp/it/products/product03/product01.html>
- [9] RTDS Technologies: "VSC Small Time-Step Modeling", pp. 1.3-1.5 (2006)

第3章 MMC方式 STATCOM 実用化のための試験方法

3.1 緒言

図3-1に示したMMC方式STATCOMでは、SMの交流端子を直接に直列接続しているため、各SMの直流コンデンサは電氣的に独立させる必要がある。この構成のため、SMの制御電源についても、各SMの直流コンデンサから供給することが合理的である。このことにより、MMC方式STATCOM主回路の電気試験には、

- (1) SM数だけの独立した直流電源を用意する
- (2) 電力系統からSM直流コンデンサを充電する

のいずれかが必要である。しかしながら(1)では多数の絶縁された直流電源と各SMまでの配線が必要となり、現実的でない。一方、(2)を採用する場合、SMがスイッチングすると電力系統に影響がある、といった問題がある。

そこで、本章では、工場電源での制約、現地での商用系統への影響を考慮し、MMC方式STATCOMの主回路試験において、電力系統への影響が極力小さい試験方法について検討し、実用装置を用いての検証結果について説明する。

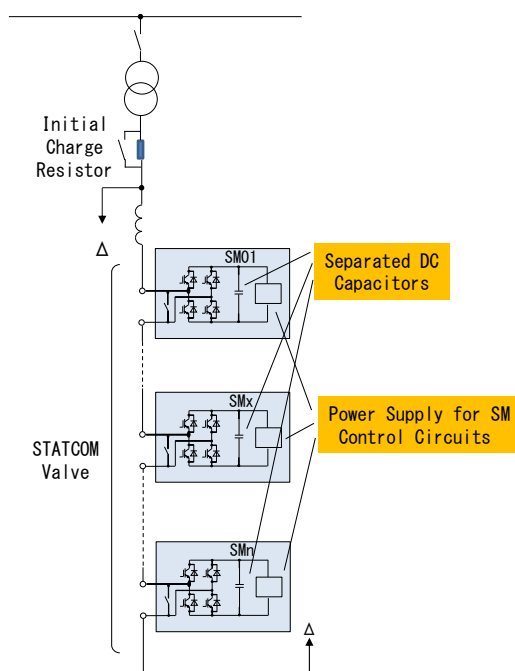


図3-1 MMC方式STATCOMの直流コンデンサに起因する問題点

3.2 MMC 方式 STATCOM の課題

図 3 - 2 は MMC 方式 STATCOM の通常の起動方法である。MMC 方式では、SM 内直流コンデンサを充電しなければ SM 内制御基板に電源供給なされず、装置を起動することができない。そこで、

- ①変換器用変圧器一次側の遮断器を投入し、
 - ②直流コンデンサを初期充電抵抗を介して充電する。初期充電抵抗を介するのは、接続時の突入電流を避けるためである
 - ③SM 基板が起動すると制御盤との通信が確立する
 - ④初期充電抵抗並列スイッチが投入され初期充電抵抗がバイパスする
 - ⑤STATCOM の運転を開始する
- の手順で起動する。すなわち、起動のために交流系統への接続が必要である。

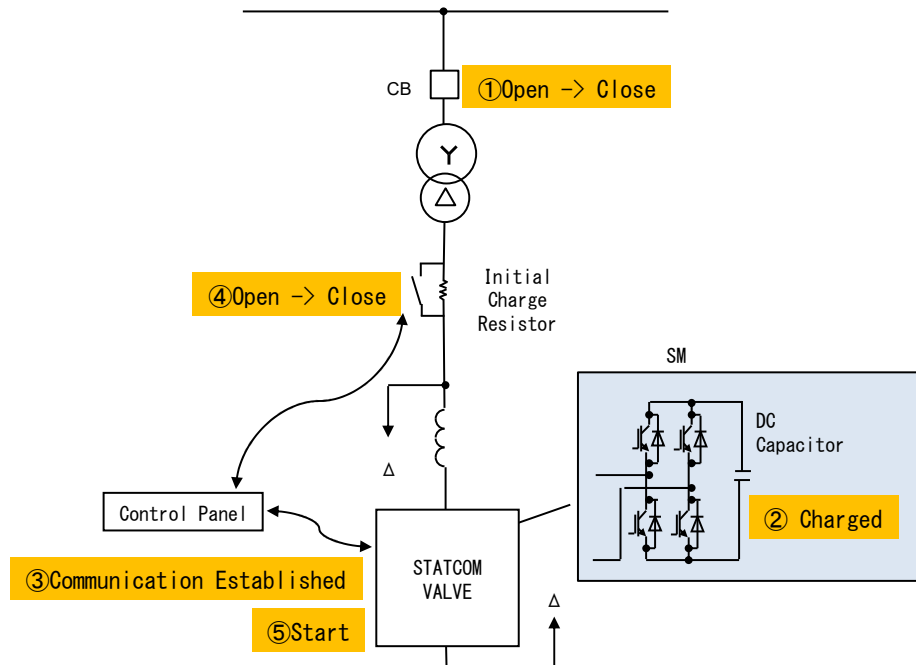


図 3 - 2 MMC 方式 STATCOM の通常の起動方法

この手順に従って工場試験ならびに現地試験を実施した場合、以下の課題がある。

（１）工場試験での課題

STATCOM 主回路に無効電流を流す通電試験を実施する際、系統に接続しての起動・運転が必要であるが、図 3 - 2 の構成にて試験を実施すると系統に無効電流が流れる。工場電源の構成・規模にもよって大小はあるものの、STATCOM が発生する無効電流によって工場電源電圧に変動が発生する。工場電源の品質維持を考えると、系統に無効電流の流れない試験方法の検討が必要である。

（２）現地試験での課題

現地での装置組み立て完成後、全SMを起動してのシステム健全性確認試験が必要であるが、その際、SMをスイッチングさせる試験が望ましい。しかしながら、商用系統に接続しての試験では、システムに万一の不具合がある場合、商用系統に悪影響を与える。そこで、初回のスイッチングを伴う起動試験では、系統から切り離して実施できる試験方法の検討が必要である。

これら(1)と(2)の課題に対し、以下のとおり装置に適用可能な試験方法を検討する。

3.3 装置の構成ならびに仕様

本章で検討の対象とする装置の主回路構成ならびに定格は2.3.1項と同じである。すなわち、主回路構成は図2-4、装置定格は表2-1のとおりである。ここで特筆すべきは、変換器の定格容量が125Mvarであることに加え、客先仕様により定格の1.25puの電流で3秒間の過負荷運転が指定されている点である。工場での通電試験では、この過負荷運転を考慮した試験が必要である。

3.4 工場試験（形式試験）の方法と結果

3.4.1 IEC62927の試験項目

2017年、STATCOMバルブの形式試験規格IEC62927が発効された。IEC62927では、形式試験として実施すべき試験項目が規定されており、耐電圧試験ならびに通電試験が必要である^{[1][2]}。形式試験は、通常出荷前に実施される必要がある。規格発効後、IEC62927が装置の試験仕様として要求されることを想定し、IEC62927に準拠して工場試験を実施することとした。

表3-1にIEC62927に定められた形式試験の一覧を示す。試験は大きく分けて、(1)運転試験、(2)耐電圧試験、(3)電磁耐性試験、(4)製品試験に分類される。

「(1)運転試験」はスイッチングを伴うバルブの通電試験である。試験には最大過負荷運転試験が含まれており、その際の無効電流が与える工場電源への影響を小さくする工夫が

表 3 - 1 IEC62927 STATCOM バルブの形式試験

Category	Test name
(1) Operational type tests	(1-1) Max. continuous operating duty test
	(1-2) Max. temporary over-load operating duty test
	(1-3) Min. start voltage test
	(1-4) Overcurrent turn-off test
(2) Dielectric type tests	(2-1) a.c. voltage test
	(2-2) Lightning impulse test
	(2-3) Switching impulse test
(3) Test for valve insensitivity to electromagnetic disturbance	Test for valve insensitivity to electromagnetic disturbance
(4) Production tests	Visual inspection, etc.

必要である。

「(2) 耐圧試験」はバルブもしくは端子に試験電圧を印加しての絶縁確認試験である。MMC 方式は、SM の直列接続により 100Mvar 超の出力を得るため、変換器交流出力電圧は数十 kV となり、高電圧の試験設備が必要ではあるものの、MMC 方式固有の課題は存在しない。

「(3) 電磁耐性試験」はバルブに電磁ノイズを与え、スイッチング等バルブ動作に不具合が発生しないかどうかを確認する試験で、MMC 方式固有の課題は存在しない。

「(4) 製品試験」は外観検査や接続チェックといった主に製造過程に関する試験で、MMC 方式固有の課題は存在しない。

3.4.2 通電試験方式の検討

表 3 - 1 「(1)Operational test」中の、「(1-1)連続通電試験」ならびに「(1-2)最大短時間過負荷運転試験」は連続通電での試験である。

直流コンデンサが共通である変換器方式の場合、例えば図 3 - 3 に示した 3 レベル変換器の場合、三相のうち二相を取り出し、直流電源により直流コンデンサを充電し、交流端子間に接続した接続リアクトル(Interconnection reactor)に通電することにより、交流端子を工場電源に接続することなく、連続通電試験ならびに最大過負荷運転試験を実施することができる。すなわち、工場電源への無効電流の流出は発生しない。

一方、MMC 方式の場合、SM の台数分の絶縁された独立直流電源の用意を避けることが必要となり、交流系統に接続しての試験が必要である。この場合、最大過負荷運転による無効電力の工場電源への影響を極力小さくすることが望まれる。

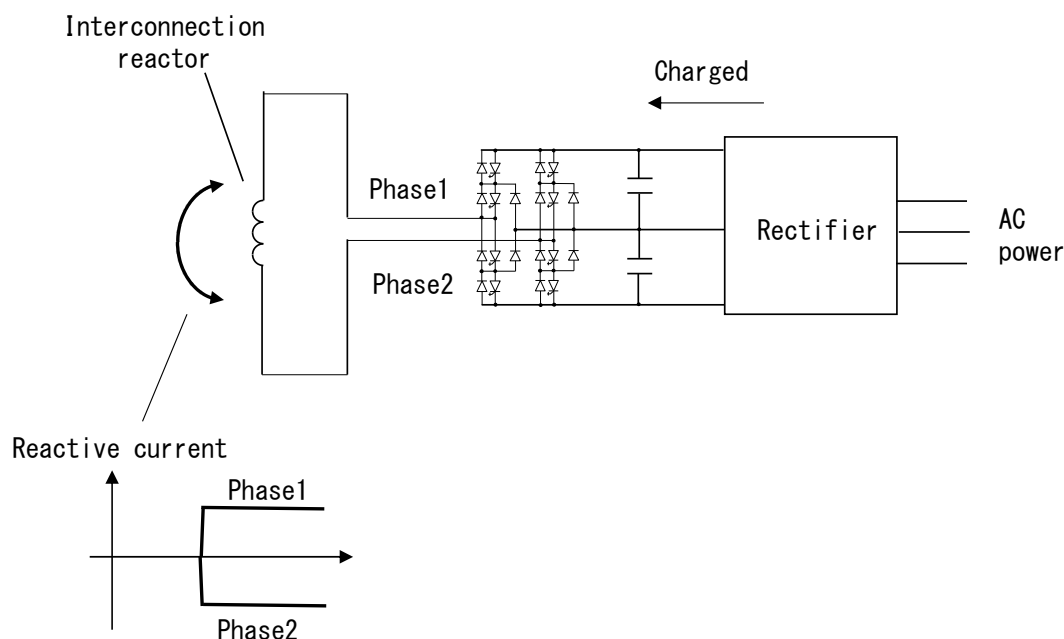


図 3 - 3 3レベル変換器適用 STATCOM の通電試験方法一例

そこで本研究では、MMC方式 STATCOM バルブの一部を用い、無効電流を相殺することにより最大過負荷運転による無効電力の工場電源への影響を小さくする試験方法を検討する。

（1）試験装置構成

図 3 - 4 に、MMC方式 STATCOM の通電試験を実施するための回路構成を、図 3 - 5 に通電試験を実施する試験装置構成を示す。三相 STATCOM バルブ 2 台を、接続リアクトルを介して交流接続し、バルブ 1 とバルブ 2 の間で無効電流を相殺する構成とする。工場電源からは、起動時の SM 直流コンデンサの充電電流、運転中のスイッチング損失、導通損失、制御電源への供給電力の合計である小さな有効電力のみが供給される。なお本試験では予期せぬ横流に備えて接続リアクトルを用いたが、通電試験には必要でないため、今後は省くことを検討する。

STATCOM 1 の制御装置と STATCOM 2 の制御装置は連携されており、無効電流を協調して制御するとともに、万一片側変換器が停止した場合は、瞬時にもう片側の変換器も停止するよう保護・停止シーケンスを構築した。

以上の構成により、工場電源への影響を最小限としつつ、短時間最大過負荷での連続運転試験を行うことができる。なお、各 STATCOM の各相 SM 数は IEC62927 で定められた最小数である 5 とする。このとき、STATCOM1 と STATCOM2 それぞれの容量は、表 2 - 1 に示した定格容量のおよそ 1/4、すなわち 30Mvar 程度となる。

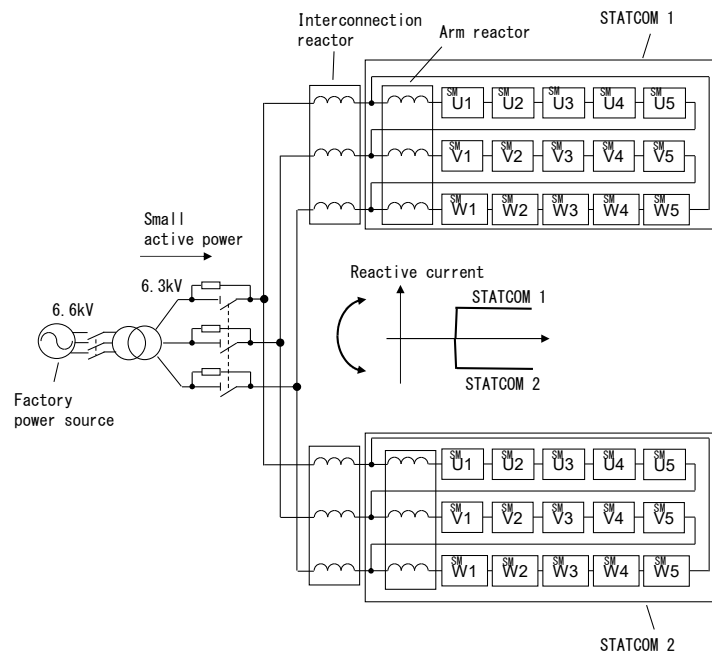


図 3 - 4 MMC 方式 STATCOM の通電試験方法

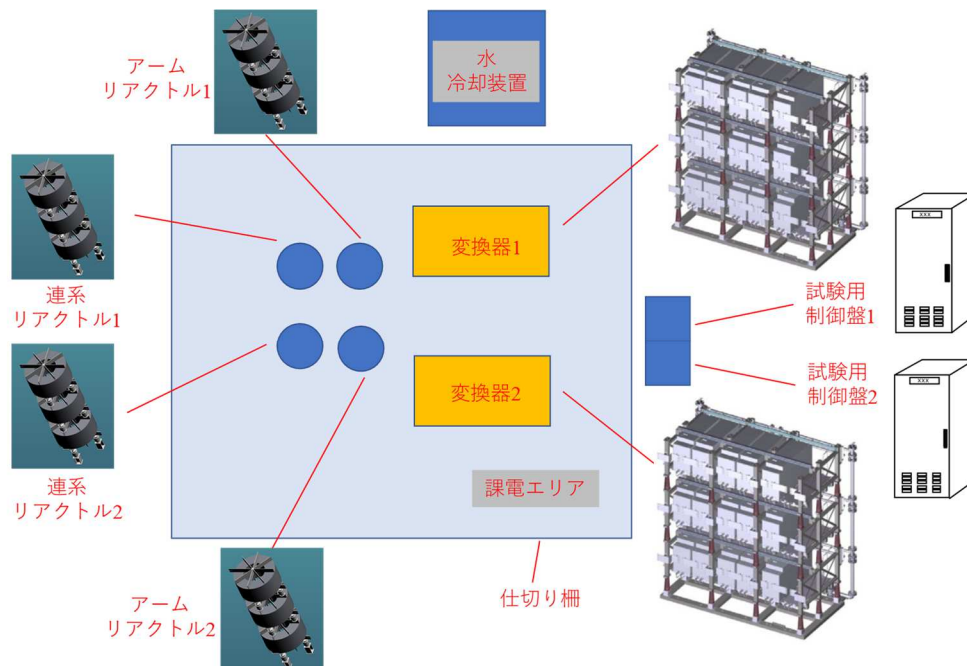


図 3 - 5 通電試験の試験装置構成

(2) 試験要件

IEC62927 による連続通電試験，最大短時間過負荷運転試験要件は，

- ①直列接続の SM 数 5 以上

- ②試験電圧は、接続 SM 数で決まる最大連続運転電圧に安全係数 1.05 倍を乗じた電圧
- ③通電電流は、安全係数 1.05 を乗じた電流
- ④連続定格通電試験の試験時間は、水温が平衡に達してから 30 分間以上運転できること
- ⑤最大短時間過負荷運転試験の試験時間は、②に連続して、短時間過負荷運転時間の 1.2 倍の時間運転し、さらに 10 分間の連続定格運転が可能なことと定められている。

そこで、通電試験の運転手順を表 3 - 2 のとおりとする。すなわち、(1)約 30 分間運転し、水温が平衡に達したことを確認した後、(2)1.05pu で 30 分間の運転を行った。その後、(3)試験要件③に従い、過負荷運転仕様 1.25pu の安全係数 1.05 倍である 1.31pu の出力電流で、試験要件⑤に従い短時間過負荷時間 3 秒の 1.2 倍である 3.6 秒間過負荷運転を行い、(4)再び 1.05pu で 10 分超の運転を行うこととする。本試験手順にて、IEC62927 に規定された「(1-1)連続通電試験」ならびに「(1-2)最大短時間過負荷運転試験」の要件を満たすことができる。

表 3 - 2 連続通電試験運転手順

Test step	Current	Time duration
(1) Preparation	1.05pu	30 min.
(2) Continuous Operation	1.05pu	30 min.
(3) Over-load Operation	1.31pu	3.6sec.
(4) Continuous Operation	1.05pu	> 10 min.

3.4.3 試験結果

図 3 - 6 に、図 3 - 4 の通電試験方法での定格電流出力運転時に採取した STATCOM1 と STATCOM2 の出力電流波形、工場電源の電流波形を示す。工場電源の電流波形については、0.1pu/div にレンジを拡大して表示している。図 3 - 6 よりわかるとおり、STATCOM1 の電流出力と STATCOM2 の電流出力により無効電流が相殺され、工場電源電流はおよそ 0.05pu と工場電源電流への無効電流出力が抑えられていることがわかる。なお、工場電源の電流波形に高調波成分がみられるが、これは実用化装置の約 1/4 の SM 数で試験しているためである。

また、図 3 - 7 に表 3 - 2 の運転の全時間波形、図 3 - 8 に過負荷運転中の時間軸拡大波形を示す。運転中に保護による停止、故障による停止は発生しておらず、定格通電ならびに過負荷通電ができることが確認できる。したがって、図 3 - 4 の試験方法にて、工場電源に与える影響を最小限にしつつ、MMC 方式 STATCOM の IEC62927 に規定された連続通電ならびに過負荷通電試験が可能である。

3.4 工場試験（形式試験）の方法と結果

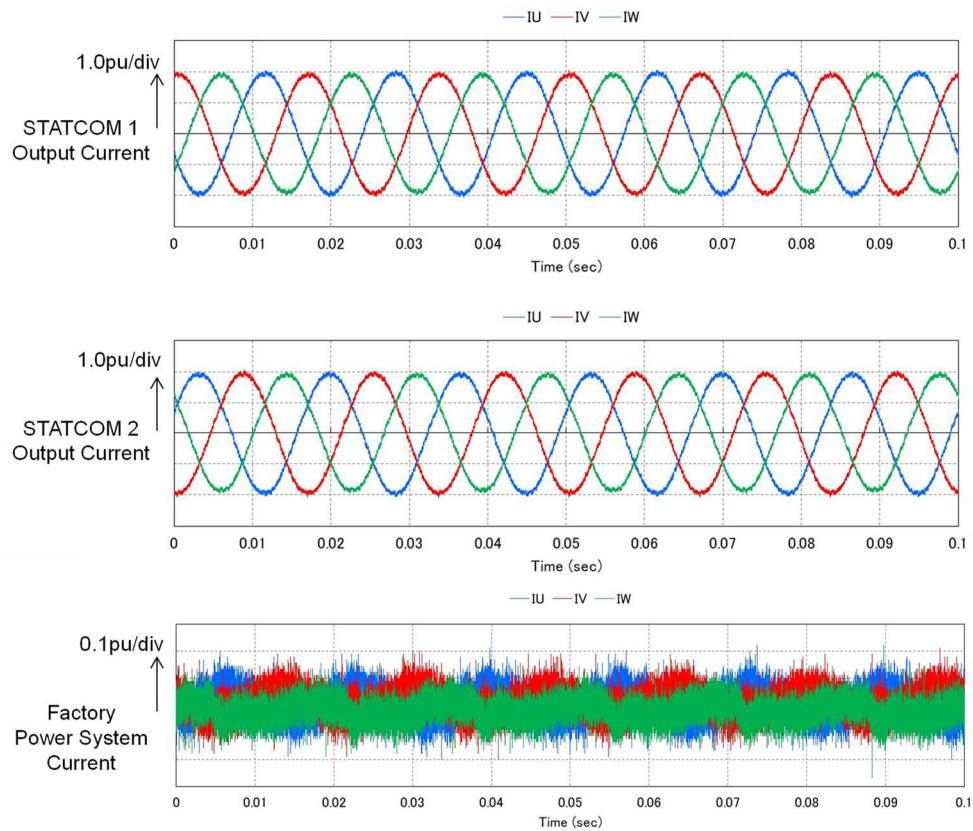


図 3 - 6 定格電流運転時の STATCOM 電流波形と工場電源電流波形

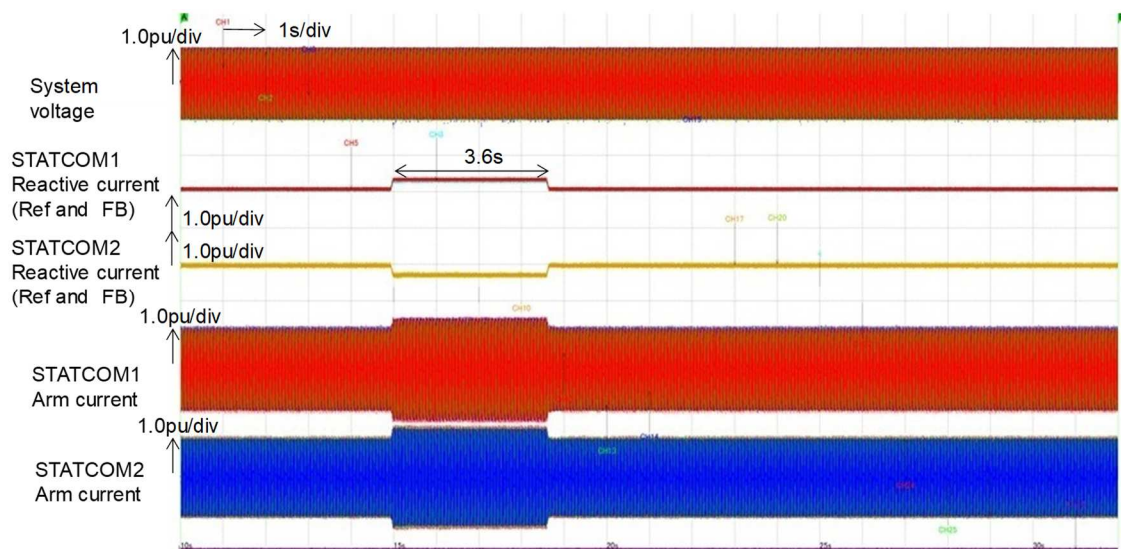


図 3 - 7 MMC 方式 STATCOM の通電試験波形(長時間)

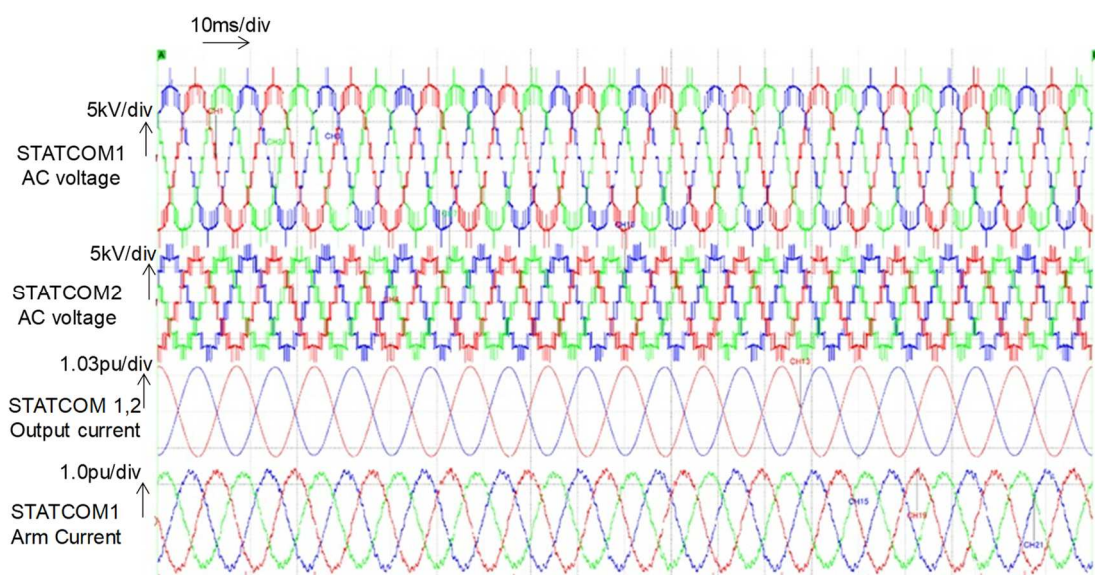


図 3 - 8 MMC 方式 STATCOM の過負荷通電試験波形(拡大)

3.5 現地試験(システムチェック試験)の方法と結果

3.5.1 現地試験項目

STATCOM を変電所に設置する際、一連の現地試験を実施しシステムの健全性を確認する必要があるが、SM 主回路に課電することが必要であるため、系統に影響を与えずに全装置を組み合わせてのシステムチェック試験を実施するには工夫が必要である。

表 3 - 3 は CIGRE の TECHNICAL BROCHURES 697 に示された HVDC システムでの現地試験項目である [3]。現地試験で必要な試験は、大きく分けて(1)機器単体試験と(2)コミッショニング試験に分かれ、コミッショニング試験は(2-1)機器間の組み合わせを確認するサブシステム試験と、(2-2)全体を組み合わせてのシステム試験に分かれる。STATCOM と HVDC において、現地試験で実施すべき項目は変わらない。

表 3 - 3 現地試験項目一例

Category	Test item
(1) Pre-commissioning or Equipment Tests	(1) Equipment Tests
(2) Commissioning	(2-1) Subsystem Tests
	(2-2) System Tests

各試験項目の詳細は以下のとおりとなる。

(1) 機器単体試験

機器はあらかじめ工場試験にて単体の健全性を確認してから出荷されるが、輸送・据付・再組立中に不具合や故障が無いことを確認するため、機器単体で健全性確認のための試験を実施する。機器単体試験に MMC 方式固有の課題は存在しない。

(2-1) サブシステム試験

電圧・電流等の検出器からの信号が正しく、所望の値として制御・保護装置に取り込めていること、機器同士の通信や保護連動が正しく動作することを確認するため、機能ごとに必要な機器を組み合わせでのサブシステム単位での試験を実施する。MMC 方式の場合、通常運転時は SM 制御基板への給電は主回路コンデンサを介してなされるが、本試験時は SM 制御基板に直接給電する外部電源を用意することによって実施することができる。

(2-2) システム試験

系統と接続し、装置が正常に動作することを確認するための試験を実施する。大容量変換器の場合、全ての構成要素を組み合わせでの試験はシステム試験が初めてとなる。MMC 方式の場合、全 SM の直流コンデンサへの充電は系統から行う必要があるため、初回のスイッチングを伴う試験で系統に影響を与えないようにすることが検討課題である。

3.5.2 システム試験項目

表 3 - 3 (2-2)「システム試験」は大きく分けて、「STATCOM は運転せず、機器に系統から電圧を印加し電気接続の健全性を確認する試験」と「系統と接続して STATCOM を運転し機能の健全性を確認する試験」に分かれる。表 3 - 4 に、本装置にて現地で実施したシステム試験項目の一例を示す。表 3 - 4 中(1)が前者に、(3) - (5)が後者に属する。CIGRE の TECHNICAL BROCHURES 697 にほぼ準拠しているが、無効電力補償装置であるため、電力融通試験は必要ない。これら試験の詳細は以下のとおりとなる。

表 3 - 4 システム試験項目一例

Category	Test case
(1) Energizing test	(1-1) Energizing of Primary Voltage BUS
	(1-2) Energizing of Transformer and Secondary Voltage BUS
	(1-3) Energizing of VSC Valve with VSC Gate Blocking
(2) System check test	Circulation Current Function check and VSC Valve Gate pulse firing check
(3) Sequence check test	(3-1) Normal START / STOP Operation
	(3-2) Protection STOP and Auto Re-Start Operation
(4) Function check test	(4-1) Reactive Current output and DC-AVR
	(4-2) AVR operation
	(4-3) Step response
(5) Heat-Run test	STATCOM Heat-Run test

(1) 充電試験

系統と接続し、系統から機器に電圧を印加し、機器接続の健全性を確認する。MMC 方式の場合、試験(1-3)にて初めて全 SM 直流コンデンサが充電され、制御盤と変換器の通信確立が確認できる。

(3) シーケンスチェック試験

系統と接続し、変換器を起動停止し、スイッチングを含めてシーケンスが正しく機能することを確認する。

(4) 制御機能チェック試験

系統と有効電力・無効電力を授受する制御機能が正しく機能することを確認する。

(5) ヒートラン試験

本来、連続定格出力にて、十時間前後の連続運転を行い、熱・電気的特性、騒音、ラジオノイズ、高調波等を総合的に測定・評価する試験である。しかしながら、系統条件にもよるものの、STATCOM の無効電力出力を相殺できる環境がない場合、出力ならびに運転時間が制約されての試験となる。

ここで、試験（１）と試験（３）の間に

（２）システムチェック試験

スイッチングならびに電圧発生を含めてシステム全体が正しく動作するかを確認する試験。不具合による系統への悪影響を避けるため、系統から切り離した状態で変換器をスイッチングさせる。

を実施して系統連系の前にシステムの健全性を確認しておきたい。MMC 方式以外の、例えば変圧器多重方式 STATCOM では、主回路制御電源は外部から供給しており、交流主回路からの供給は不要であり、直流コンデンサも電氣的に相互接続されているため、

- ①直流コンデンサに低圧の直流電圧を印加し、
- ②変換器素子をゲートデブロックし、
- ③変圧器一次側、二次側に低圧の交流電圧を発生させる、ことにより、スイッチングならびに電圧発生して制御装置と主回路の健全性を確認することができる。一方、MMC 方式の場合、多数の SM 直流コンデンサに同時に直流電源を用意することは非合理的である。そこで本研究では 3.5.3 項に示した方式でシステムチェック試験を実施することとする。

3.5.3 システムチェック試験方法の検討

MMC 方式の場合、SM 直流コンデンサを充電するには、一旦系統に接続する必要がある。一方、変換器のスイッチング時は系統から切り離しておきたい。図 2 - 4 に示した実用化装置は主回路 SM がアームリアクトルを介してデルタ結線されている。そこで本研究では、MMC 方式 STATCOM のこの特徴に着目し、系統切り離し後にバルブのデルタ結線内を流れる循環電流を出力・測定することによって、変換器・制御の健全性を確認する循環電流発生試験を実施することとする^[4]。

図 3 - 9 に循環電流発生試験方式の手順を示す。図 3 - 9 に示したとおり、

- ①変換器用変圧器一次側の遮断器を投入する
- ②SM コンデンサを充電する
- ③充電完了すると VSCC と SM の通信が確立し、VSCC より SM の状態監視、制御が可能となる
- ④変換器用変圧器一次側の遮断器を開放し、系統と切り離す
- ⑤VSCC から SM ゲートパルス発生し、循環電流指令を増加ー循環減少後ゲートブロックし、試験を完了する

この試験では、循環電流フィードバックの循環電流指令との一致を確認することで、主回路結線、SM-VSCC 間通信、VSCC 制御の健全性が確認できる。なお、系統から切り離すことで直流コンデンサ電圧は時間とともに低下するが、1 秒程度の短時間であれば運転状態を続けることができる。

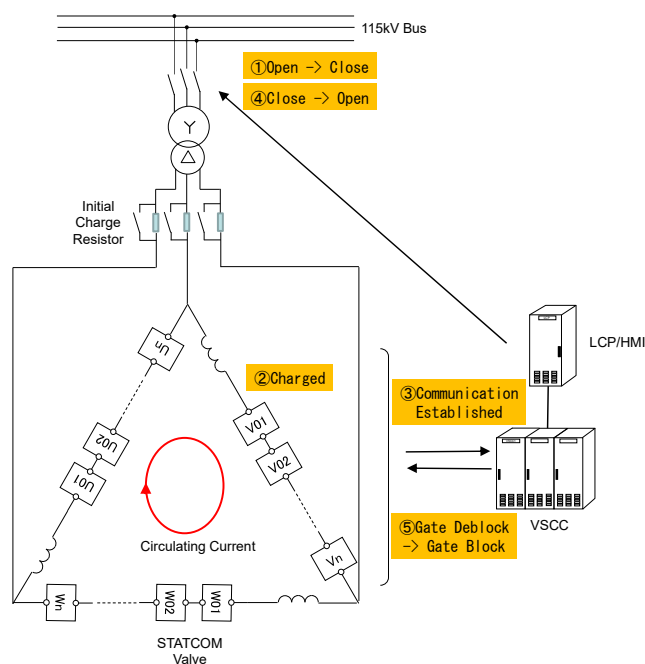


図 3 - 9 システムチェック試験方法

なお、リアルタイムシミュレータ試験については、2.4.1項にて、現地の装置構成については2.5.1項にて説明したものと同一であるので説明は省く。

3.5.4 循環電流試験結果

図 3 - 10 にリアルタイムシミュレータを用いた循環電流試験波形を、図 3 - 11 に実系統での試験波形を示す。Reference で示す循環電流指令は、約 100m 秒間 0.2pu の基本波電流とする。

循環電流指令が基本波交流指令であること、循環電流制御は交流成分のまま制御していることにより、指令値と Feedback で示す循環電流フィードバックに位相差と振幅偏差が残

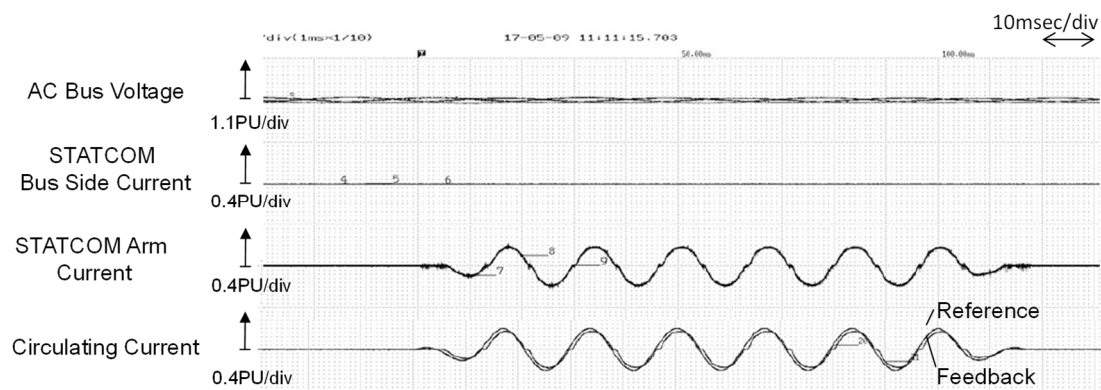


図 3 - 10 循環電流を用いたシステムチェック試験波形(シミュレータ試験)

るが、現地試験での試験波形にて、循環電流フィードバックは指令値によく一致し、また図 3 - 11 のリアルタイムシミュレータにて事前に採取した波形ともよく一致している。

この試験により主回路結線，SM-VSCC 間通信，VSCC 制御の健全性ならびに事前のリアルタイムシミュレータ試験と同様な正常性が確認できる。

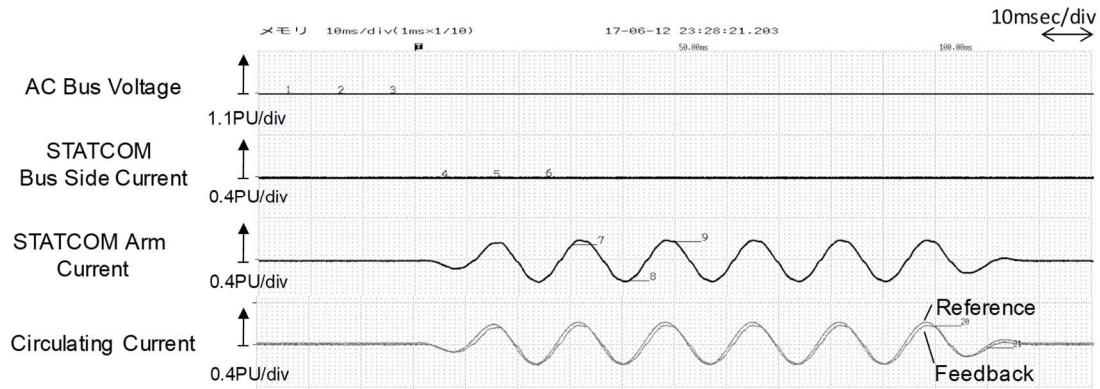


図 3 - 11 循環電流を用いたシステムチェック試験波形(現地試験)

3.6 結言

本章では、モジュラー・マルチレベル STATCOM の実用化装置で実施可能な、工場での最大過負荷運転試験方法ならびに現地でのスイッチングならびに電圧発生を行うシステム試験方法について検討した。結果は以下にて要約される。

(1) 工場での最大過負荷運転試験では、SM5 個からなる MMC 変換器 2 台を交流端子で接続し、無効電流を相殺することで、系統に無効電流を流出させない試験方法を検討した。検討試験方式にて、IEC62927 に準拠した、過負荷仕様の安全係数 1.05 倍の電流にて、仕様時間の 1.2 倍の運転を行った後、再び定格の安全係数 1.05 倍の電流で 10 分超の運転ができることを確認できた。本試験方法により、MMC 方式 STATCOM の工場試験を実施することができる。

(2) 現地でのシステムチェック試験では、STATCOM バルブを一旦系統に接続し、SM 直流コンデンサを充電、制御装置との通信を確立させたのち、系統連系の遮断器を開放した状態で、STATCOM のデルタ結線に循環電流を流す試験方法を検討した。検討試験方法にて、事前に工場で実施したリアルタイムシミュレータ試験波形と同一の結果が得られ、主回路結線，SM-VSCC 間通信，VSCC 制御が健全であることが確認できた。本試験方法により、MMC 方式 STATCOM の現地システムチェック試験を実施することができる。

参考文献

- [1] B. Sheng, C. Danielsson, R. Neubert, J. Turunen, Y. Lan, F. Xu, H. Zhang and F. Nakamura: “Electrical Test of STATCOM Valves”, CIGRE 2016, Session B4-210

第3章 MMC方式 STATCOM 実用化のための試験方法

(2016)

- [2] Voltage sourced converter (VSC) valves for static synchronous compensator (STATCOM) - Electrical testing, IEC Standard 62927 (2017)
- [3] Testing and commissioning of VSC HVDC systems, CIGRE TECHNICAL BROCHURES 697 (2017)
- [4] 米村 直樹, 奥山 涼太, 土谷 多一郎:「デルタ結線 MMC の通電試験手法」, 2018 年電気学会全国大会, 4-041 (2018)

第4章 自励式 BTB の接地方式に関する研究

4.1 緒言

HVDC においては，送電線熱容量限界および線路損失の観点から，直流電圧を高くしたいという要望があり，SM 数の設計変更が容易で直流電圧が調整可能な MMC 方式は，HVDC システムに適した主回路方式である。MMC 方式を適用した HVDC システムは，2007 年に Siemens 社が HVDC PLUS という商標名で提唱し^[1]，2010 年に米国 Trans Bay Cable link にて商業運転が開始されている^[2]。

MMC 方式は，送電線を除いた HVDC システムである BTB(Back-To-Back)システムへも適用が可能である。図 4 - 1 に示した従来の BTB システムでは，直流電圧が数 kV と比較的低い。このため，高抵抗を介して直流端子の片側を接地する方式でも絶縁設計上の影響は軽微である^[3]。しかしながら，MMC 方式の場合，装置容量によるものの変換器直流電圧は数百 kV となり，対地絶縁部材のコストと耐震強度を考えると，できるだけ直流電圧の中間電位で接地したい。一方，自励式変換器では，変換器の電圧利用率改善のため中性点電圧に三次高調波を重畳することが一般的であり，交流成分に対しては接地を避けインピーダンスを高くしたい^[4]。

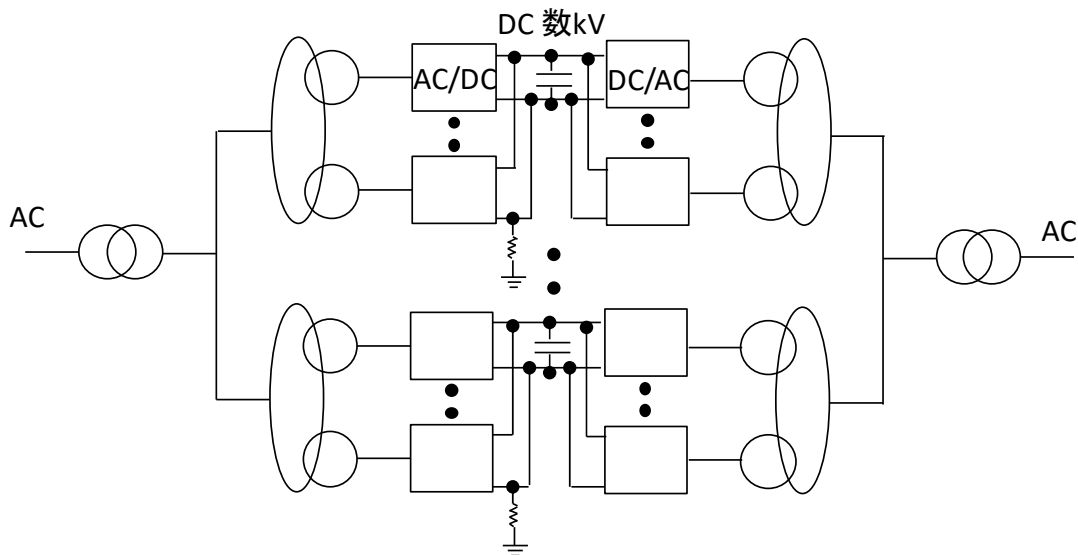


図 4 - 1 従来の BTB システム構成図

そこで，本研究では，MMC 方式を適用した BTB の実用化に際して必要となる接地方式について，

- (1) 問題の簡素化のために送電線の影響を排除して，送電線を除いた HVDC システムであ

る BTB (Back-To-Back) システムの接地方式の違いによる、直流端子地絡時の事故電流ならび通常運転時の直流端子の対地電圧特性を比較検討することにより、変換器側母線のリアクトル接地方式の利点を明確にし、

(2) 変換器側変圧器の中性点をリアクトル接地する方式を提案し、

(3) 対地浮遊キャパシタンスおよび大地漏れ抵抗の影響を考慮して接地リアクトルのインダクタンス、抵抗値の制約事項を求め、

(4) 接地リアクトル小型化手法について論ずる。

なお、本研究では、単極構成のシステムを対象とし、直流中性線を接地することが一般である双極構成については対象としない。

4.2 BTB システムの接地方式比較

4.2.1 直流側接地方式

図 4 - 2 に BTB システムに適用される接地方式の分類を示す^[6]。BTB システムに適用される接地方式は、大きく分けて (a) 直流端子片極を直接接地する方法、(b) 直流端子間に接地回路を設け直流電位の間電位で接地する方法、(c) 交流回路に接地回路を設け、中性点電位で接地する方法、の 3 方式が考えられる。ここでは、これら 3 方式の特徴について論じ、自励式 BTB システムに最適な接地方式を論ずる。

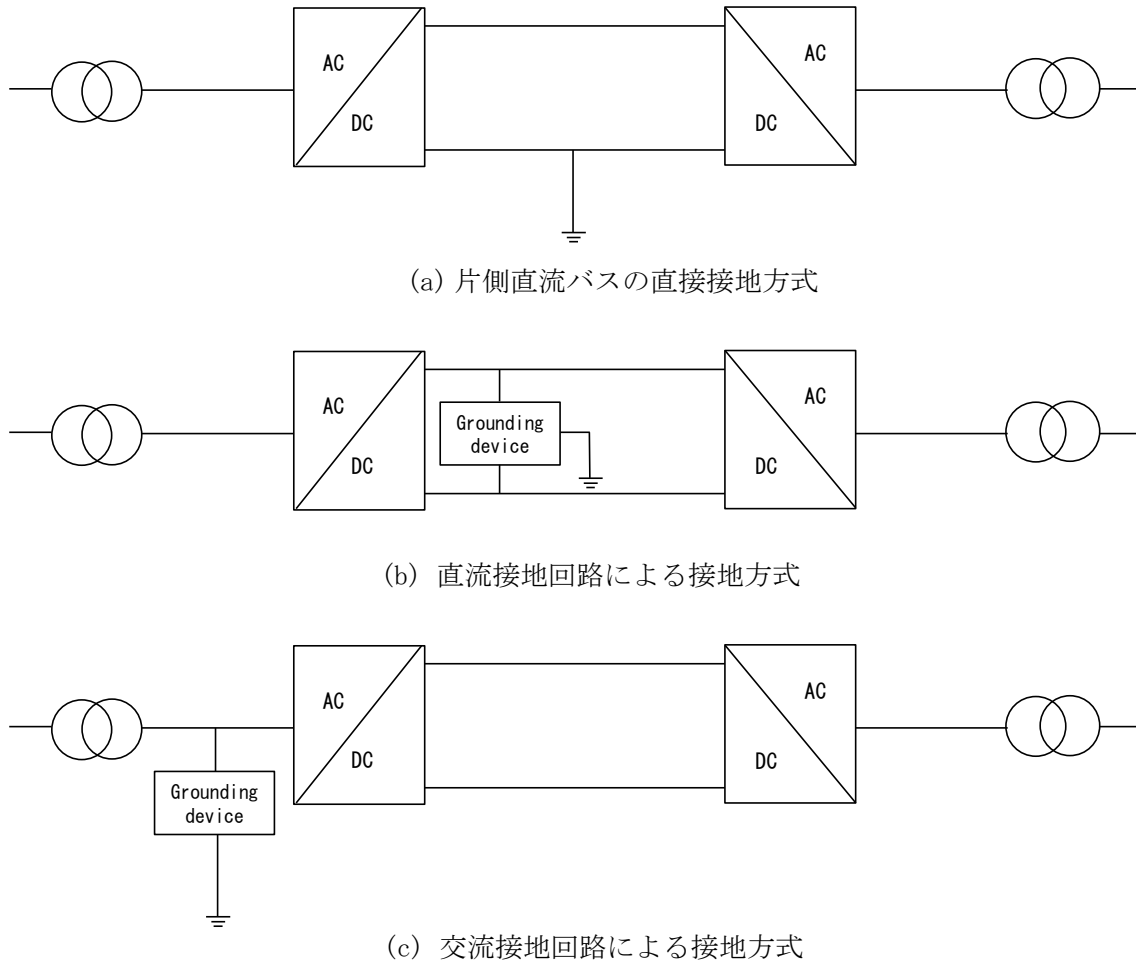


図 4 - 2 HVDC システムの接地方式例

(1) 直流片側電位接地方式

図 4 - 2(a)は直流片側電位接地方式の構成図である。直流片側電位接地方式では、直流回路の片側を完全接地する。この場合、変換器バルブの対地絶縁部分は、全直流電圧に対する耐圧を持たせる必要があり、中間電位接地した場合に比べるとバルブの対地絶縁がいしがり長くなり高コストとなる。また、図 4 - 3 に示したとおり、非接地側直流電位で地絡事故が発生すると、直ちに直流短絡となり、SM 内 IGBT 逆並列ダイオードが短絡電流で破損する。破損を避けるため、SM の保護対策が必要である。従って、できるだけ直流電圧の中間電位で接地できる別の方式が望まれる。

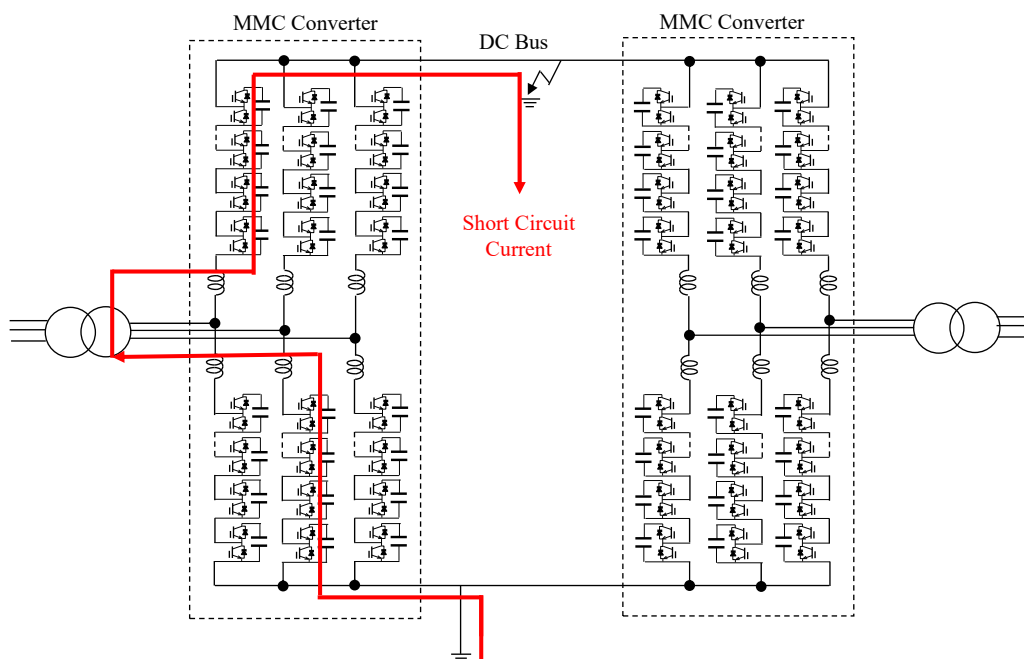
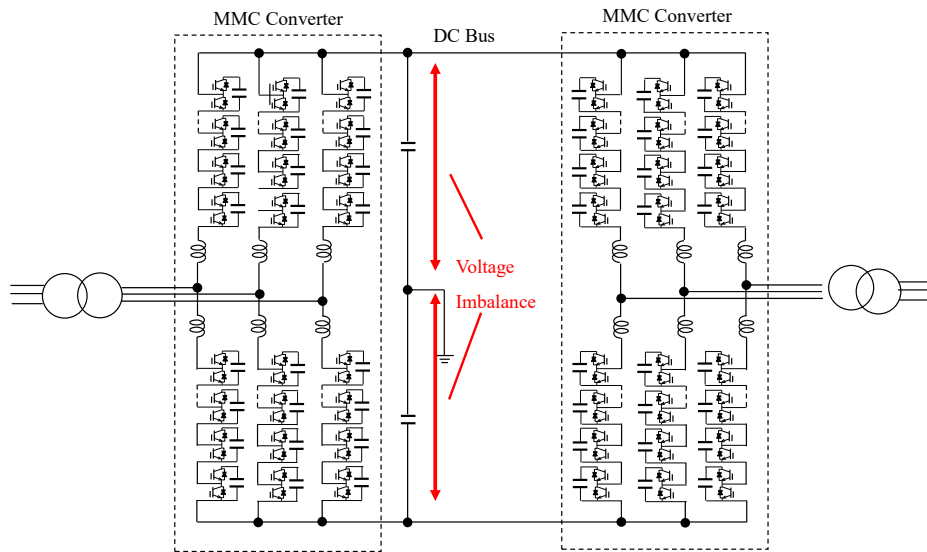


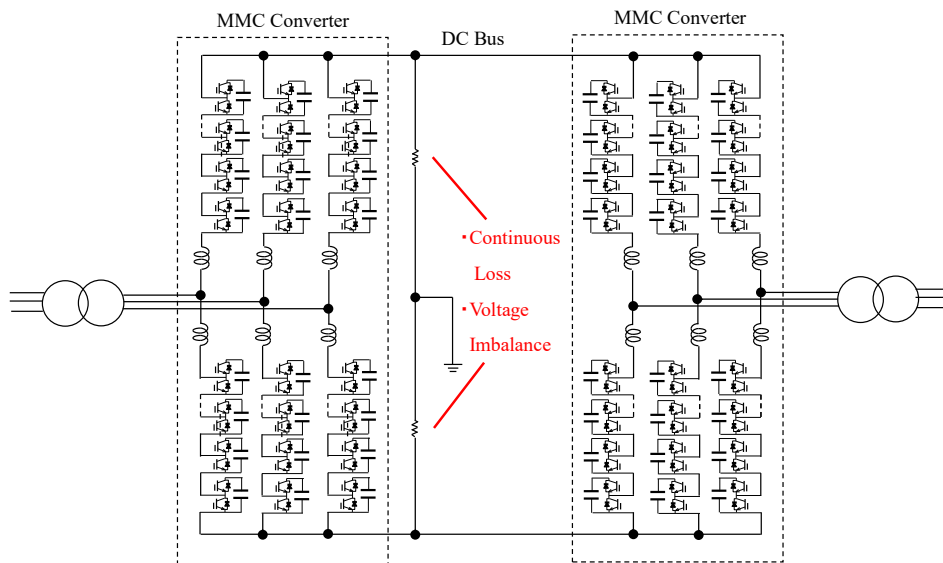
図 4 - 3 直流直接接地の場合の地絡経路

(2) 直流中間電位接地方式

図 4 - 2(b)は直流中間電位接地方式の構成図である。直流中間電位接地方式は、直流回路上に直流電位を分圧する接地回路を設け、直流電圧の中間電位で接地する方式である。接地回路の具体的方式としては、図 4 - 4(a)に示した直列接続コンデンサで直流電圧を分圧する方式と、図 4 - 4(b)に示した直列接続抵抗で直流電圧を分圧する方式が考えられる。直流電圧の中間電位で接地することができるため、正負の直流電位をほぼ均等にすることができ、バルブの対地絶縁部分は、直流地絡時の短時間過電圧をアレスタにより制限すれば、全直流電圧の約半分の耐量で設計することができる。すなわち、バルブの対地絶縁がいしがり短くなり低コストとなる。また、直流電位で地絡事故が発生しても、直流回路上の分圧回路、例えば図 4 - 4(a)ではコンデンサが、図 4 - 4(b)では抵抗が短絡されるのみで、直流短絡とならないため、SM 内 IGBT 逆並列ダイオード破損は発生せず、SM の保護対策が必要ない。



(a) 直列接続コンデンサを用いた接地方法



(b) 直列接続抵抗を用いた接地方法

図 4 - 4 直流接地回路を用いた接地方式一例

SM の IGBT 素子は冷却フィンに取り付けられ、冷却水によって冷却されている。冷却水は冷却配管を通して屋外熱交換器へと導かれるが、冷却配管は途中で大地電位に接する。この SM から冷却水を介して大地に接地するまでの電気抵抗が漏れ抵抗となる。

図 4 - 5 に、図 4 - 4(a)に示した直列接続コンデンサにて分圧する方式の、漏れ抵抗と直列接続コンデンサの回路構成を示す。正極側対地電圧と負極側対地電圧は、コンデンサが直流に対して高インピーダンスであるため、正極側漏れ抵抗と負極側漏れ抵抗の比率で決まる。一方、SM 配置や冷却配管経路が正極側と負極側で非対称性になるため、正極側の漏

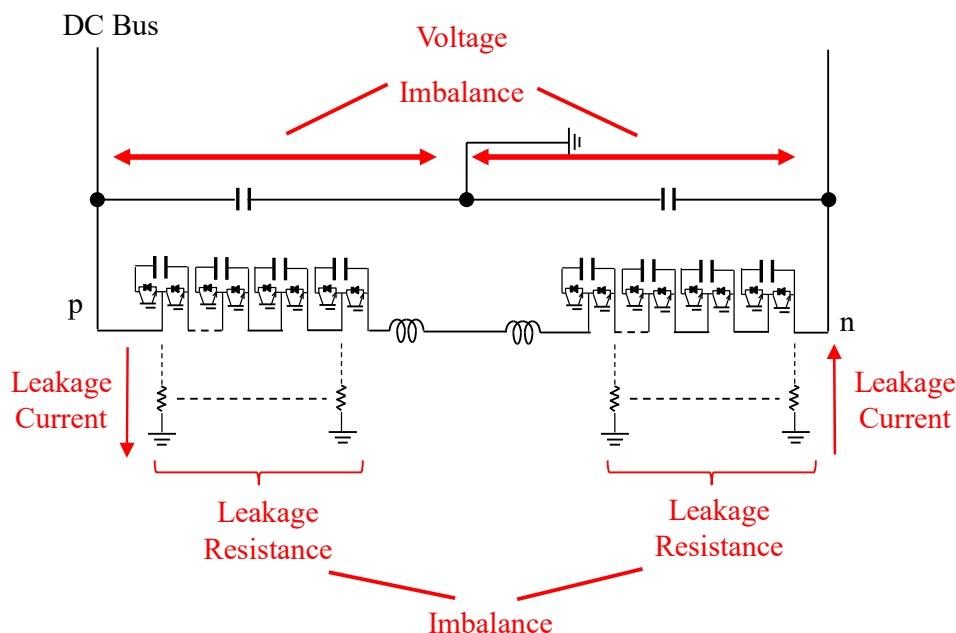


図 4 - 5 図 4 - 4(a) の回路での漏れ抵抗回路

れ抵抗値と負極側の漏れ抵抗値を同一にすることはできず、結果、大地に対する正側電位と負側電位が非対称となる。非対称の度合は、SM 配置や冷却配管の経路によって決まり、10% を越える大きな差異となることもある。この場合、通常的设计裕度に加えてさらに裕度を持った対地絶縁がいし設計が必要となり、コスト高を招き望ましくない。直列接続コンデンサにて分圧する方式は、安全上の理由で直流コンデンサに放電回路を設ける必要があり、構造の複雑化を招くというデメリットもある。

図 4-6 は、図 4-4(b)に示した直列接続抵抗にて分圧する方式の漏れ抵抗と直列接続抵抗の回路構成である。直列接続抵抗にて分圧する方式も、直列接続抵抗の抵抗値が漏れ抵抗より大きな値の場合、正極側漏れ抵抗と負極側漏れ抵抗に比率で正極側対地電圧と負極側対地電圧が決まる。正極側漏れ抵抗値と負極側漏れ抵抗値が非対称の場合、非対称の度合いによっては対地絶縁がいしがコスト高となる。

直列接続抵抗にて分圧する方式の場合、直列接続抵抗の値を漏れ抵抗の値より小さくすることによって非対称を避けることができるが、この場合は常時損失が大きくなり、放熱・冷却機構に配慮が必要となるというデメリットが発生する。

4.2.2 交流側接地方式

図 4 - 2 (c)は交流側接地方式の構成図である。交流側接地方式は、変換器交流側に接地回路を設け、交流中性点電位で接地する方式である。

交流回路の中性点で接地することができるため、正負の直流電位をほぼ均等にすることができ、バルブの対地絶縁がいしは、全直流電圧の約半分の耐量で設計すればよく、低コス

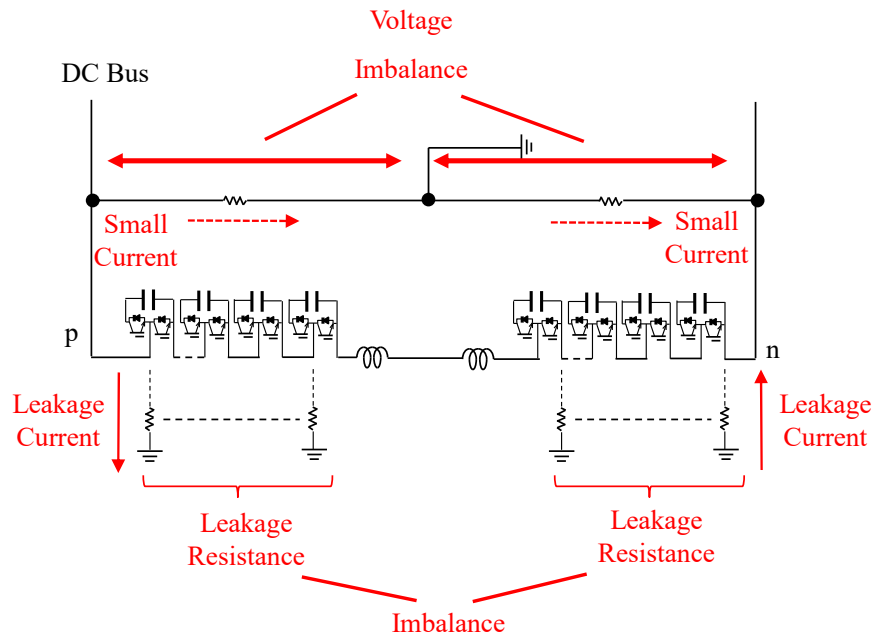


図 4 - 6 図 4 - 4 (b)の回路での漏れ抵抗回路

トにできる。また、直流電位で地絡事故が発生しても、直ちには直流短絡とならないため、直流短絡時の SM 保護対策が特段必要でない。尚、直流地絡事故発生時、ゲートブロックまでの間非地絡側端子の対地電位絶対値が全直流電圧にシフトするが、絶縁がいしの規格にて 20ms 以下の短時間過電圧耐量であれば連続耐圧の約 2 倍が適用されるので、アレスタの作動電圧を 2pu に設定することにより、直流アレスタを用いて対地電位絶対値を 2pu 以下に抑制し、約半分の耐圧設計でも耐え得ることができる^[6]。ただし、アレスタはこの間の処理エネルギーで破損しないように容量設計する必要がある。尚、酸化亜鉛 (ZnO) 素子では短時間の過電圧に対しても作動する十分な応答速度を有している^[7]。

図 4 - 7 は、接地回路をリアクトルで構成した場合の構成例である^[8]。自励式変換器では、直流電圧に対する交流出力の利用効率を改善するため、各相交流電圧に定格の 0.15pu 程度の同相三次高調波を重畳することが一般的である^[4]。この場合、重畳三次高調波が中性点電位に発生するため、交流成分に対しては相応のインピーダンスを持たせたい一方、直流端子電圧を固定するため、直流成分に対するインピーダンスは低くする必要がある。接地回路をリアクトルで構成することにより、直流成分に対してインピーダンスを低く、交流成分に対してインピーダンスを高くすることができる。また、リアクトルで交流電流を抑制できるため、常時損失もほとんど発生しない。

このように、他の 2 方式と比較して、優れた特長のある交流側接地方式であるが、図 4 - 7 の方式では、各相ごとにリアクトルが必要、リアクトルを介して線間に流れる無効電流を小さくするために大きなリアクタンスのリアクトルが必要である、というデメリットがある。

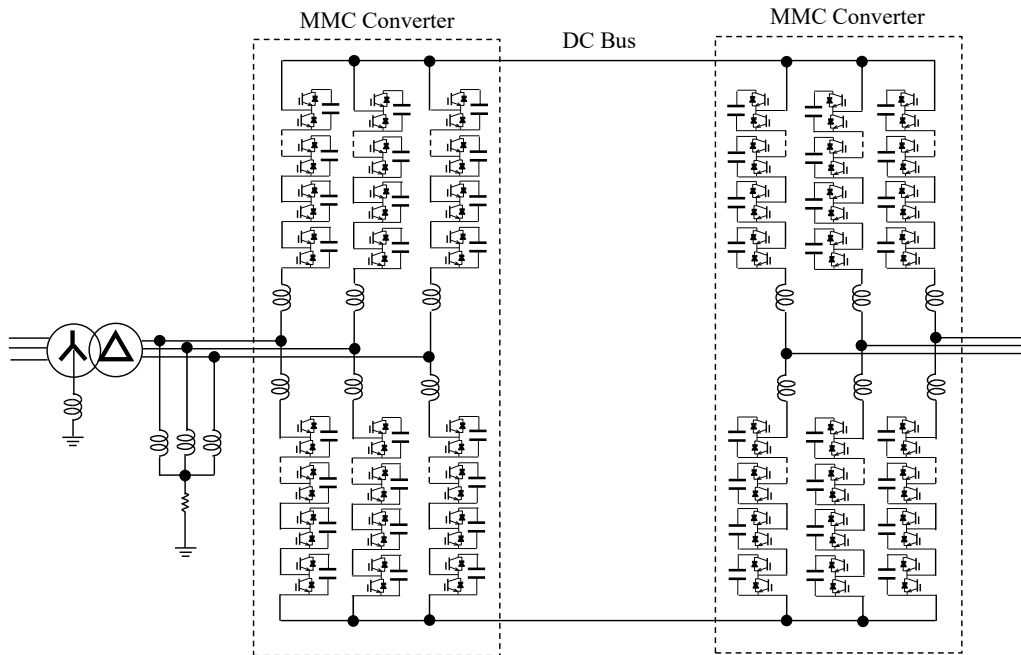


図 4 - 7 交流接地回路での接地方式一例

本研究では、通常変換所の所内電源用に変圧器が必要であることに着目し、変換器用変圧器三次巻線をデルタ結線、変換器側巻線をスター結線とし、接地回路をその中性点に接続する方式を提案した。図 4 - 8 に構成図を示す。図 4 - 7 ならびに図 4 - 8 にて二次巻線または三次巻線にデルタ結線を用いているのは、一次側のスター結線中性点が直接接地され

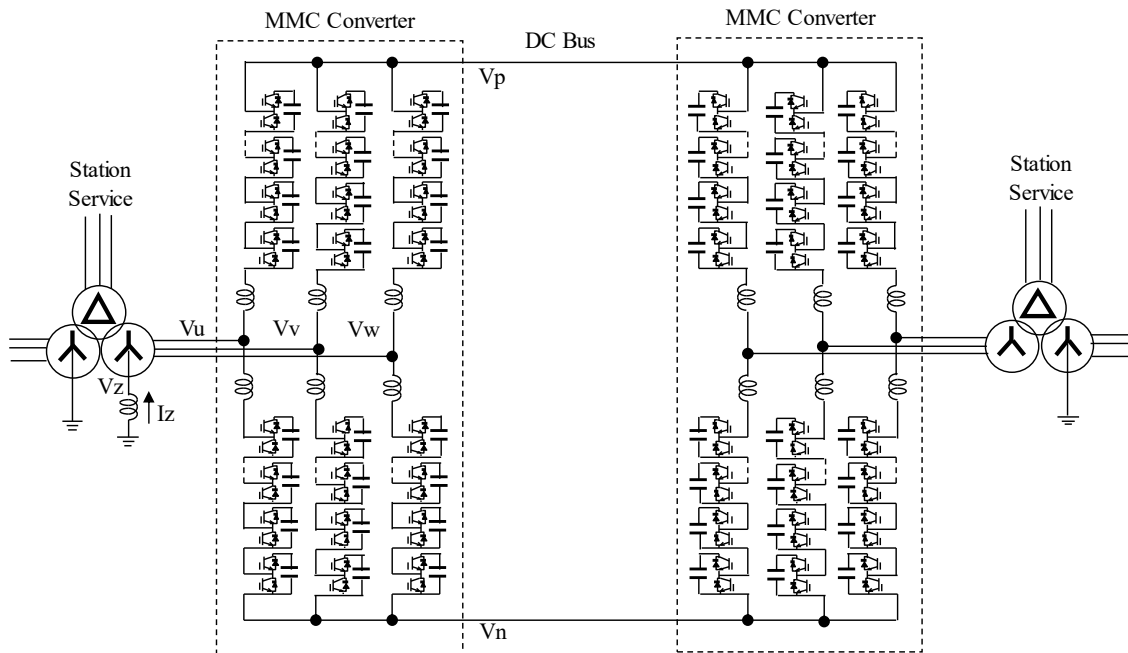


図 4 - 8 中性点接地リアクトルを用いた接地方式

ているため、変圧器にて零相電流の経路を設ける必要があるためである。本方式を用いることにより、線間に流れる無効電流の影響を排除し、リアクトル容量を小さくすることができ、またリアクトルの個数を1個とすることができる。

4.3 交流側中性点接地リアクトル設計手法検討

4.3.1 三次高調波電流の検討（地絡時電流の検討）

中性点接地リアクトル設計手法の検討に先立ち、定格事項を定める。基準インピーダンス Z_r は（式 4 - 1）にて定める。ただし、 Q_r は変換器定格容量、 V_r は変換器交流定格電圧である。

$$Z_r = V_r^2 / Q_r \quad (\text{式 4 - 1})$$

この時、各相に流れる定格電流 I_r は（式 4 - 2）で得られる。

$$I_r = Q_r / (\sqrt{3} V_r) = V_r / (\sqrt{3} Z_r) \quad (\text{式 4 - 2})$$

基準インピーダンスを元に基準インダクタンス L_r を（式 4 - 3）の通り定める。ただし f_0 は変換器交流側定格周波数である。

$$L_r = Z_r / (2\pi f_0) \quad (\text{式 4 - 3})$$

同様に、基準キャパシタンス C_r を（式 4 - 4）の通り定める。

$$C_r = 1 / (2\pi f_0 Z_r) \quad (\text{式 4 - 4})$$

（式 4 - 3）と（式 4 - 4）は、変換器交流定格電圧に、これら値のリアクトルならびにキャパシタがスター結線で接続された場合、定格基本波電流が流れることを意味する。（式 4 - 3）（式 4 - 4）より、基準インダクタンス L_r と基準キャパシタンス C_r の関係式（式 4 - 5）を得る。

$$C_r = 1 / \{(2\pi f_0)^2 L_r\} \quad (\text{式 4 - 5})$$

通常の運転では、変換器の大地に対するインピーダンスは大きく、中性点電位に三次高調波が現れても大地電流はほとんど流れない。しかしながら、直流回路に地絡が発生すると、接地リアクトルを通過して三次高調波電流が流れる。地絡事故時の三次高調波電流を抑制するには、あるリアクタンス以上の大きなリアクトルが必要となる。

三次高調波電流は、直流事故中の短時間のものであることより、リアクトルの体積を大きくしない程度かつ許容できる電流値として 0.01pu 以下とした。重畳三次高調波電圧を定格の 0.15pu とすると、満たすべき条件は（式 4 - 6）のとおりとなる。

$$0.15 V_r / (\sqrt{3} 2\pi 3 f_0 L) < 0.01 I_r \quad (\text{式 4 - 6})$$

従って、（式 4 - 2）および（式 4 - 3）を用いて、（式 4 - 6）よりインダクタンスの下限値（式 4 - 7）を得る。

$$L > 0.15 L_r / (3 \cdot 0.01) = 5 L_r \quad (\text{式 4 - 7})$$

4.3.2 対地浮遊キャパシタンスの検討（定常運転時の電流検討）

図4-9はBTBシステム上の浮遊キャパシタンスを示した図である。常時運転時も浮遊キャパシタンスは三次高調波に対する循環電流経路として働く。接地リアクトルの三次高調波に対するインピーダンスが低いと、中性点に常時三次高調波電流が流れるとともに、直流母線電位に三次の脈動が発生する。このことは、絶縁設計の際に上記電圧脈動分の余裕が必要であることを意味する。従って、接地リアクトルの値は、浮遊キャパシタンスの三次高調波に対するインピーダンスより十分大きな値であることが望ましい。

一般化のため、十分大きなインピーダンスとして、浮遊キャパシタンスに対する接地リアクトルのインピーダンスがちょうど k 倍となる条件は（式4-8）となる。

$$2\pi 3f_0 L = k / (2\pi 3f_0 C_s) \quad (\text{式 4-8})$$

ここで、BTBシステムの実際の機器配置ならびに機器構造を考慮し、浮遊キャパシタンスを計算した。変圧器については同等容量製品の設計値を、配線、AC機器、DC機器についてはIEEE規格を、バルブに関しては静電容量解析結果を用いた^[9]。結果、変圧器交流側（配線、AC機器（開閉器、アレスタ、VT等）、変換器バルブのAC印加部分） $2.2 \times 10^{-3} C_r$ 、DC側（配線、DC機器（開閉器、アレスタ、VT等）、変換器バルブのDC印加部分） $5.8 \times 10^{-4} C_r$ であった。これらが並列接続されているとして両者の合計を求めると、BTBシステムの浮遊キャパシタンスは、（式4-9）の値となった。

$$C_s = 2.78 \times 10^{-3} C_r = (1/360) C_r \quad (\text{式 4-9})$$

（式4-8）に、（式4-5）および（式4-9）を用いると（式4-10）が得られる。

$$L = 40kL_r \quad (\text{式 4-10})$$

十分に大きな値として、 $k > 10$ を条件として与えると、

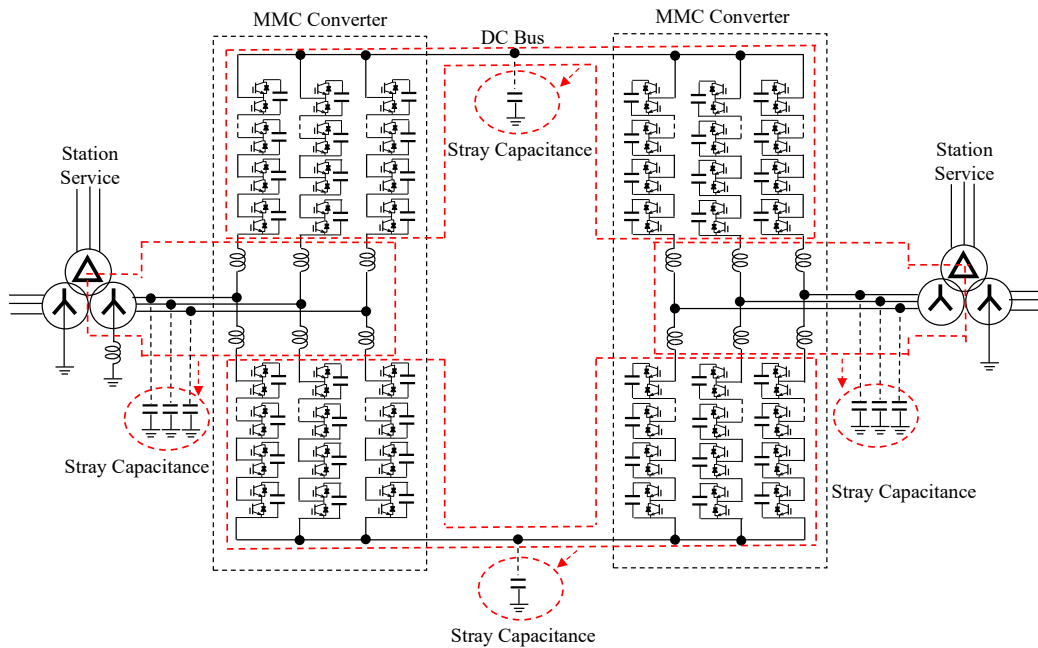


図4-9 浮遊キャパシタンス回路

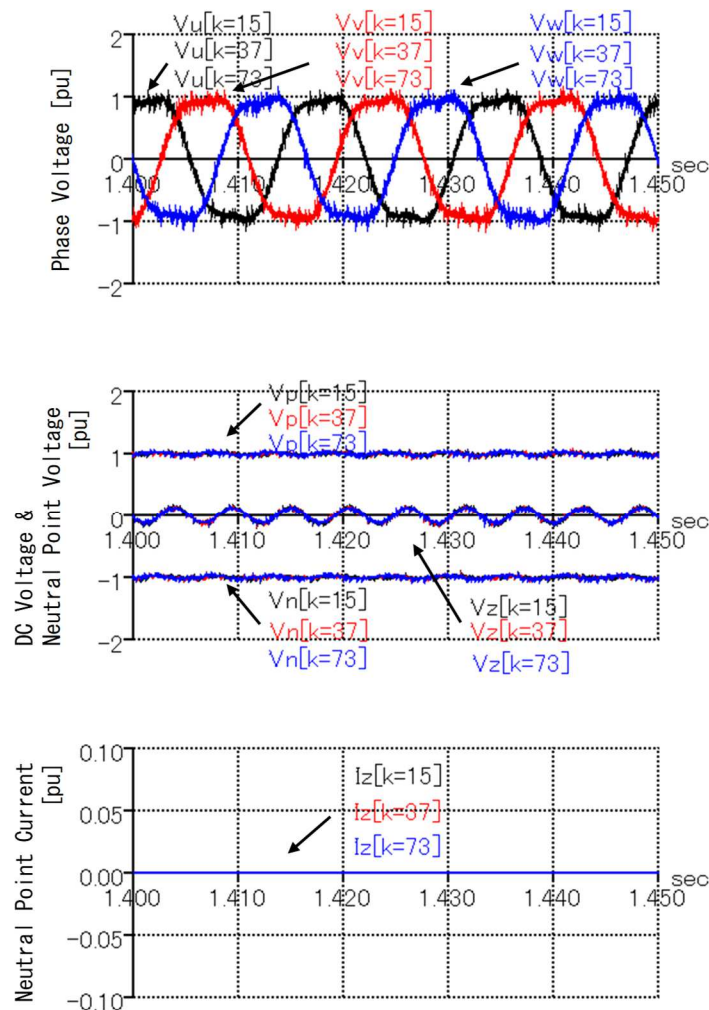
$$L > 400L_r$$

(式 4 - 11)

となる。ここで (式 4 - 7) と比較すると、(式 4 - 11) の方がより厳しいインピーダンス条件となっていることがわかる。すなわち、地絡事故発生時に接地リアクトルに流れる電流を 0.01pu 以下にする条件より、三次高調波に対する常時運転時の対地浮遊キャパシタンスのインピーダンスを接地リアクトルのインピーダンスの 10 倍以上とする条件の方が厳しい条件であることがわかる。

直流電圧を確認するため、 $k=15$ ($L=600L_r$)、 $k=37$ ($L=1480L_r$)、 $k=73$ ($L=2920L_r$) と変化させ、PSCAD/EMTDC を用いて瞬時値解析を実施した。図 4 - 10 上段に変換器交流電圧波形、中段に正側と負側の直流電圧波形、中性点電圧、下段に中性点電流を示す。各電圧・電流の検出点は図 4 - 8 中に示した。ただし、中性点電圧に関しては、比較のため、直流電圧で規格化した。交流電圧波形、直流電圧波形ともに全ケースでほとんど波形が重なっている。

交流電圧波形でピーク付近が平らになっているのは、三次高調波を重ねているためである。一方、直流電圧には三次高調波の脈動はほとんど現れておらず、また、正負電圧のア

図 4 - 10 k の変化に伴う直流電圧波形

ンバランスも発生していない。中性点電流もほとんど流れていない。 $k=15\sim 73$ の範囲では、直流母線電圧波形に顕著な差異は見られず、 $k\geq 15$ であれば定常運転時に十分な接地効果が得られていることがわかる。すなわち、リアクトルは交流成分に対しては高インピーダンスであるため三次高調波電流はほとんど流さないのに対し、直流成分に対しては低インピーダンスであるため直流電位を中間電位に固定することができた。

4.3.3 浮遊キャパシタンスとの共振検討（定常運転時の電流検討）

図 4 - 9 に示した対地浮遊キャパシタンスは、接地リアクトルと直列共振回路を形成している。対地浮遊キャパシタンスと接地リアクトルの直列共振回路の共振周波数 f を求めると（式 4 - 12）となる。

$$f = f_0 / \sqrt{(L/L_r)(C_s/C_r)} \quad (\text{式 4 - 12})$$

（式 4 - 12）に（式 4 - 10）ならびに（式 4 - 9）を用いると（式 4 - 13）が得られる。

$$f = 3f_0 / \sqrt{k} \quad (\text{式 4 - 13})$$

（式 4 - 13）より、 k が大きくなるにつれて共振次数は低くなり $k=9$ にて基本波次数となることがわかる。共振次数が基本波に近いと、変換器側交流回路での不平衡事故発生時に、共振が発生するので望ましくない。共振周波数を下げること対策する場合、ある値以上の大きなリアクトルが必要となる。ここでは、 $f \leq 0.5f_0$ とすることとし、（式 4 - 13）式より（式 4 - 14）を、（式 4 - 10）より（式 4 - 15）を得た。

$$k > 36 \quad (\text{式 4 - 14})$$

$$L > 1440L_r \quad (\text{式 4 - 15})$$

（式 4 - 15）は（式 4 - 7）、（式 4 - 11）よりも厳しいインピーダンス条件となっている。すなわち、対地浮遊キャパシタンスと接地リアクトルの直列共振回路の共振周波数を基本波周波数の 0.5 倍以上とする条件が、地絡事故発生時に接地リアクトルに流れる電流を 0.01pu 以下にする条件、三次高調波に対する常時運転時の対地浮遊キャパシタンスのインピーダンスを接地リアクトルのインピーダンスの 10 倍以上とする条件よりも厳しい条件であることがわかる。

4.3.4 大地漏れ抵抗影響の検討（定常運転時の対地電圧検討）

図 4 - 5 に示した通り、変換器は冷却水を介して、大地に漏れ抵抗で接続されている。リアクトルの抵抗値 R_r が大地漏れ抵抗より大きいと接地効果が損なわれる、正負端子の大地漏れ抵抗の非対称によって対地直流電圧に不平衡が発生する、という問題が発生する。これらも絶縁がいし設計に余裕を必要とするので、リアクトルの抵抗値 R_r はある値以下とする必要がある。一方、大地漏れ抵抗値は、以下の条件で決められている。変換器バルブの水配管に接続された金属継手は、冷却水による漏れ電流が 5mA 付近を越えると腐食が増加し始める^[10]。腐食した金属は、長期間水配管に析出し続け絶縁性能を低下させる。従って腐食を防ぐため漏れ電流を抑制することが必要で漏れ抵抗値はある値以上とする必要がある。

裕度を考慮して漏れ電流 3.5mA 以下とした場合、大地漏れ抵抗 R_l (pu) の最小値は (式 4 - 16) となる。ただし、 V_{dc} は対地直流電圧、 n は片側電位 2 端子あたりの大地に接している水配管の本数である。

$$R_l = \frac{V_{dc}}{3.5 \times 10^{-3}} \frac{1}{Z_r} \frac{1}{n} \quad (\text{式 4 - 16})$$

(式 4 - 16) を用いて BTB システムの実際の機器レイアウトならびに機器構造より漏れ抵抗を求めたところ、(式 4 - 17) の値となる。

$$R_l = 25000 Z_r \quad (\text{式 4 - 17})$$

ここで、自励式直流送電機器の型式試験に関する規格にて、耐圧試験電圧の安全係数が定格の +0.1pu ~ +0.15pu であることを考慮し、大地漏れ抵抗 R_l による直流電圧変化を 0.01pu 以下とすることとした^[11]。この時、 R_r の満たすべき式は (式 4 - 17) より (式 4 - 18) となる。

$$R_r < 0.01 R_l = 250 Z_r \quad (\text{式 4 - 18})$$

以上の結果をまとめると、接地リアクトルの制約は表 4 - 1 の通りとなり、 L の満たすべき条件は (式 4 - 19) の範囲となる。

$$L > 1440 L_r \quad (\text{式 4 - 19})$$

表 4 - 1 得られたリアクトル条件

Conditions	L and R_r requirement
3rd harmonic current	$L > 5 L_r$
Stray capacitance	$L > 400 L_r$
Anti-resonance	$L > 1440 L_r$
Leakage resistance	$R_r < 250 Z_r$

4.4 リアクトル小型化検討

4.4.1 空心リアクトルでの解析

(式 4 - 19) の結果に裕度を設け、接地リアクトルのインダクタンスを $L=1600 L_r$ ($k=40$) とする。しかしながら、 $L=1600 L_r$ はかなり大きな値で、大型、高価格となる。そこで、実用化を念頭に置いて、以下のとおり小型化の検討を行う。

(1) 空心リアクトルでの基本特性確認

小型化検討に先立ち、選定リアクトルの特性を確認するため、PSCAD/EMTDC を用いて瞬時値解析を実施した。中性点に $L=1600 L_r$ の空心リアクトルを接続し、正側直流電位で地絡事故を発生させた。変換器は、事故発生からおよそ 1 周期後、交流過電流を検出し、ゲートブロック停止する。その後、50ms で変圧器一次側遮断器を開放する。事故発生から遮断器開

放までの間、SM 内 IGBT に逆接続されたダイオードの整流動作により、直流電圧が印加され直流電流が増加し続ける。保護装置の構成にもよるが、およそ基本波 5-6 周期間である。ゲートブロック時間ならびに遮断器開放時間は、変換器 2 台が別の交流系統に接続されているため時間差が発生する。

図 4-11 に解析結果を示す。図 4-11 より、接地によって事故発生前の正負直流電位がバランスしていることが確認できる。一方、事故発生後は、地絡事故点である正側電位が零に、負側電位が直流端子間電圧にシフトする。事故発生後、変圧器系統側の遮断器が開放されるまで直流電流が増加し続けるものの、接地リアクトル電流のピークは 0.014pu であり、接地効果が得られるとともに、過大な電流が流れておらず、狙い通りの性能が発揮できていることがわかる。

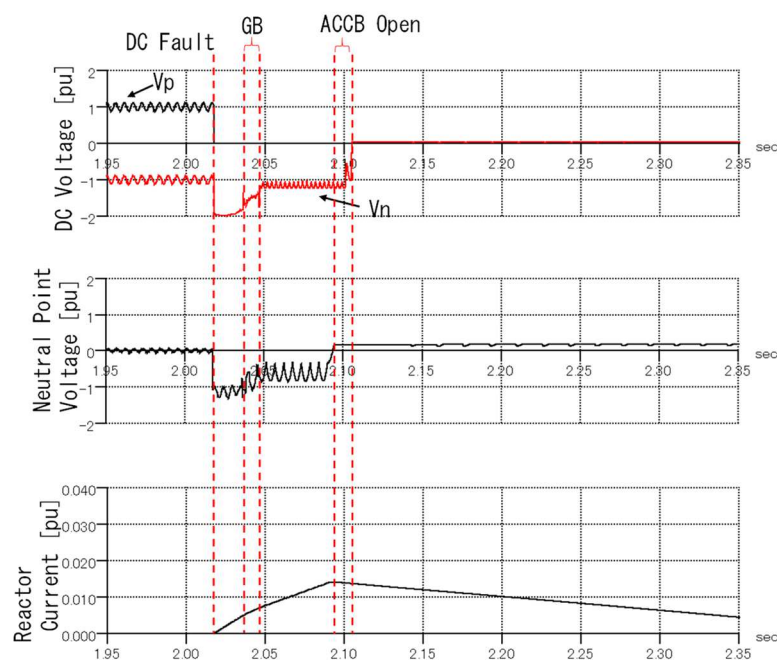


図 4-11 空芯リアクトルを用いた場合の電圧・電流波形

4.4.2 鉄心リアクトルの適用検討

次に、リアクトルを小型化するため、鉄心リアクトルの適用を検討する。ただし、地絡検出手段としての利用も考え、電圧検出変成器 VT (Voltage Transformer) にて検討する。シミュレーション上は VT 二次側を開放としたため一次側に与える影響はなく、リアクトル接地と電氣的に同等とみなすことができる。実用上も二次側は高インピーダンス負担となり同様である。VT を用いず鉄心リアクトル+地絡電流検出用 CT とする構成も考えられるが、直流電流に対応して DCCT が必要となり高価であるため、実用上有利である本構成を検討する。また、地絡発生時には VT に電流が流れるが、BTB においては通常直流母線が建屋内に配置されるため、人、動物、飛来物、落雷等により容易に地絡が発生しないような配線が可能で

あることにより、異常発生時かつ短時間に限られ問題ない。図 4 - 12 に回路構成を、図 4 - 13 曲線(a)に VT の VI 特性を示す。ここでは、一般的な VT の適用を想定し、一線地絡時のピーク電圧で飽和を開始する特性とする。

図 4 - 14 に直流端子地絡事故波形を示す。事故継続中は接地リアクトルに直流電圧が印加され続け、鉄心が直流偏磁により磁束飽和し、定格の 0.13pu のかなり大きな電流が流れ

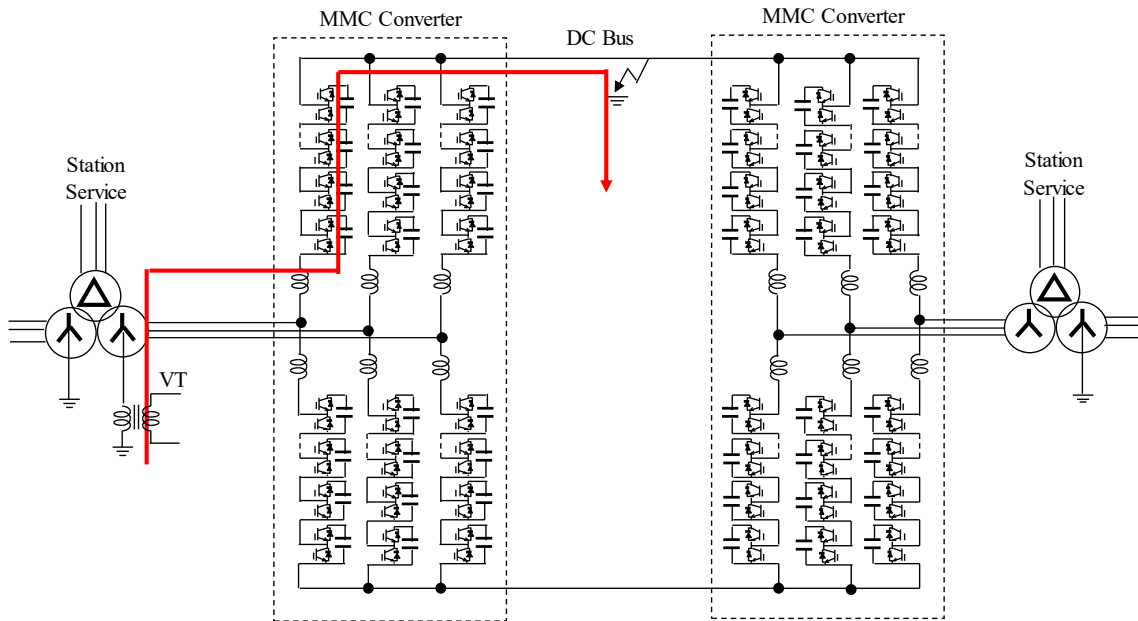


図 4 - 12 VT 適用時の接地回路

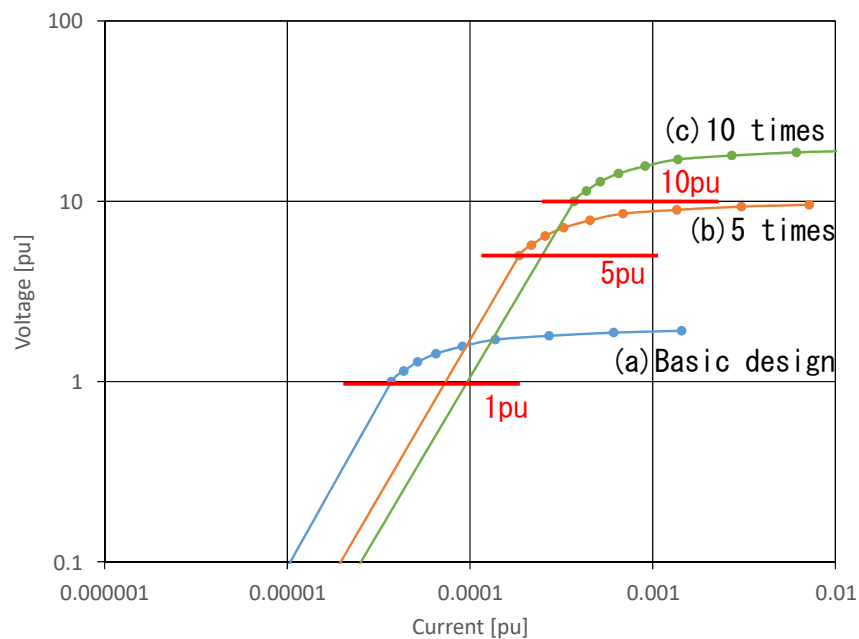


図 4 - 13 検討 VT の VI 特性

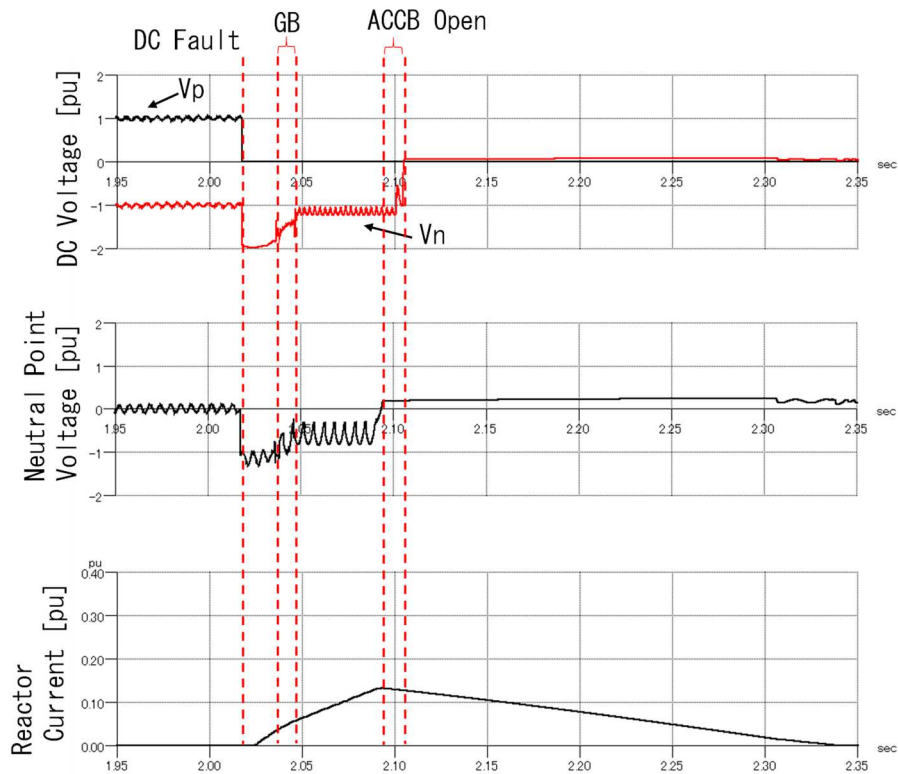


図 4 - 14 鉄心付き VT を用いた場合の電圧・電流波形

ることがわかる。鉄心の適用により単位体積あたりのインダクタンスが高くできる効果が期待できる一方、巻線に要求される最大電流定格が大きくなるという課題のあることがわかった。そこで、次の課題として、直流事故時の電流抑制方法について検討する。

4.4.3 VI 特性での抑制検討

まず、直流事故時の電流増加の原因が、VT 鉄心の偏磁・飽和に起因することに着目し、VT の VI 特性設計を見直し、飽和開始電圧を高くすることにより直流偏磁・飽和を起こりにくくし、事故時電流を抑制する方法について検討する。VI 特性は、図 4 - 13 に示した(a)飽和開始電圧 1pu, (b)飽和開始電圧 5pu, (c)飽和開始電圧 10pu の 3 特性とし、直流事故時の中性点電流を PSCAD/EMTDC を用いた瞬時値解析にて求める。

図 4 - 15 に直流端子地絡時の中性点電流波形を示す。なお、同図において括弧内の数字は抑制した中性点電流値を示す。飽和開始電圧 1pu の VT では、中性点電流が定格の 0.13pu であったのに対し、飽和開始電圧 5pu の VT では 0.02pu, 10pu の VT では 0.0001pu に電流を抑制することができた。事故発生から事故遮断までのおよそ 5-6 周期の間直流電圧が印加され続けることを考えると、5-10 倍の飽和開始電圧が必要であることは妥当な結果である。しかしながら、4.3.1 項の条件と同じく、直流事故時の中性点電流値基準を 0.01pu 以下とすると、飽和開始電圧 10pu の VT が必要となり小型化の目的を満たすことができない。

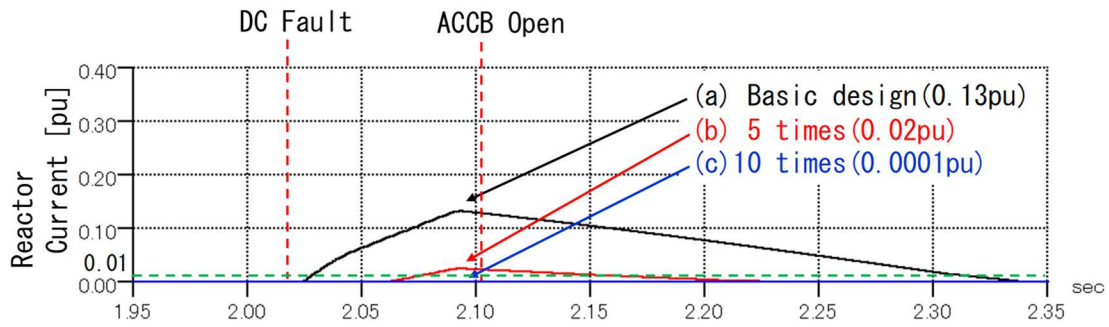


図 4 - 15 飽和特性を変化させた場合の中低線電流波形

4.4.4 限流抵抗での抑制検討

鉄心付きの VT を用いた場合、VI 特性の変更では直流事故時の電流値を抑制できないことがわかったため、直列抵抗を接続することにより電流抑制する方式について検討する。図 4 - 16 に構成図を示す。

図 4 - 16 の構成にて、抵抗値と中性点電流の関係を調べるため、抵抗値を定格の 5.6pu から 5600pu に変化させて、直流電流、抵抗の消費電力、抵抗の処理エネルギーを PSCAD/EMTDC を用いた瞬時値解析により求める。ただし、抵抗で処理されるエネルギーについては、消費電力 $1\text{pu} \cdot 1\text{秒}$ を 1pu とする。図 4 - 17 に中性点電流、抵抗の消費電力、抵抗の処理エネルギーを、表 4 - 2 にこれらの値を、図 4 - 18、図 4 - 19、図 4 - 20 に抵抗値との関係を示す。図 4 - 18、図 4 - 19、図 4 - 20 より、中性点電流、抵抗の消費電力、抵抗の処理エネルギーとともに、抵抗値に対して反比例的に減少する特性が得られる。

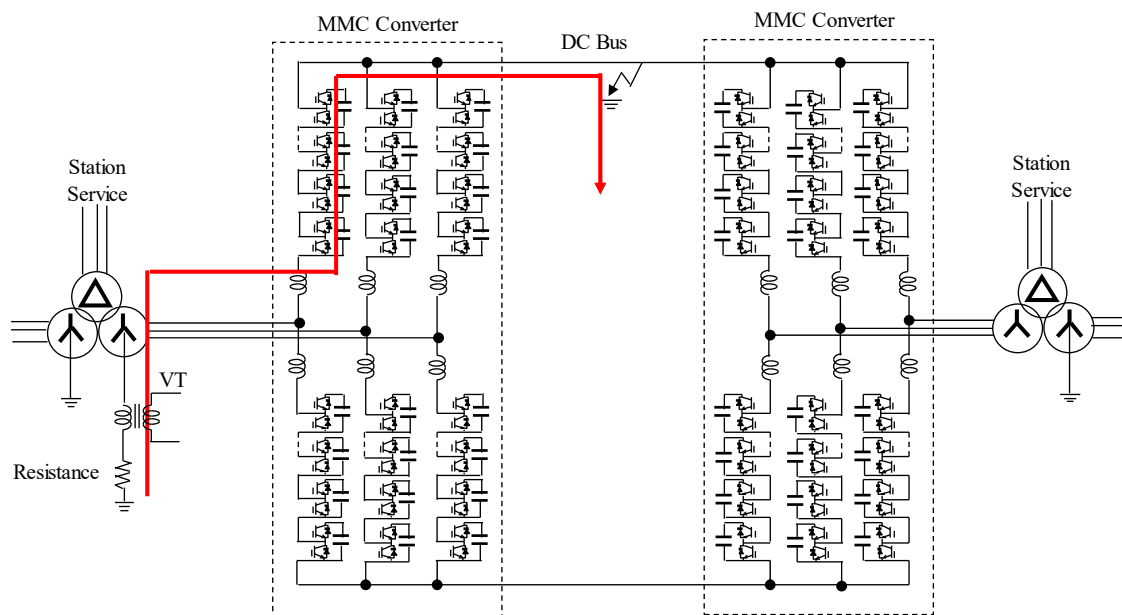


図 4 - 16 VT に直列抵抗を接続した場合の接地回路

4.3.1 項の条件と同じく直流事故時の中性点電流値基準を 0.01pu 以下とすると、解析ケースの中では、抵抗値 56pu がほぼ 0.01pu となり、 $R_c < 56Z_r$ が得られる。

したがって、(式 4 - 14) の上限を考えると、抵抗値の範囲は 56pu から 250pu となり、56pu から 250pu の直列抵抗を接続することで、 $L=1600L_r$ 、飽和開始電圧 1pu の鉄心入り VT を適用することができて VT を小型化できる。

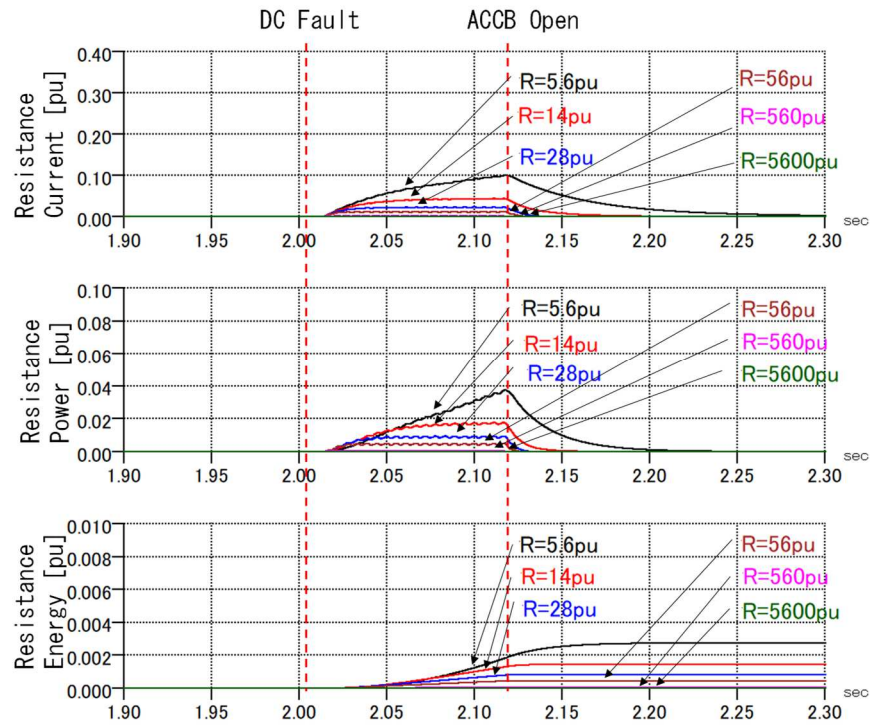


図 4 - 17 抵抗値変化に伴う直流電流，抵抗の消費電力，抵抗の処理エネルギー波形

表 4 - 2 中性点電流最大値，抵抗の消費電力最大値，抵抗の処理エネルギー

Resistance (pu)	Maximum Current (pu)	Maximum. Power (pu)	Dissipation Energy (pu)
5.6	1.0×10^{-1}	3.7×10^{-2}	2.7×10^{-3}
14	4.3×10^{-2}	1.8×10^{-2}	1.4×10^{-3}
28	2.2×10^{-2}	9.3×10^{-3}	8.2×10^{-4}
56	1.1×10^{-2}	5.0×10^{-3}	4.4×10^{-4}
560	1.3×10^{-3}	6.8×10^{-4}	4.8×10^{-5}
5600	1.2×10^{-4}	5.5×10^{-5}	4.9×10^{-6}

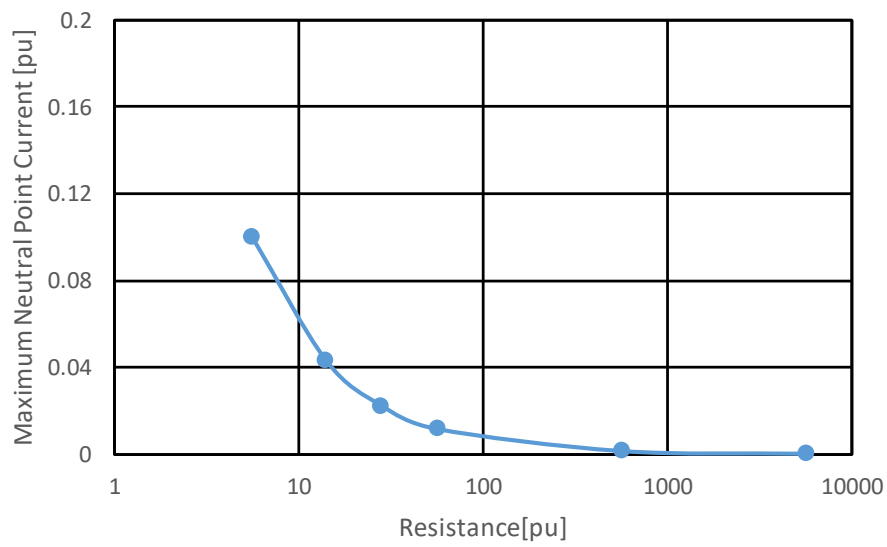


図 4 - 18 中性点電流最大値

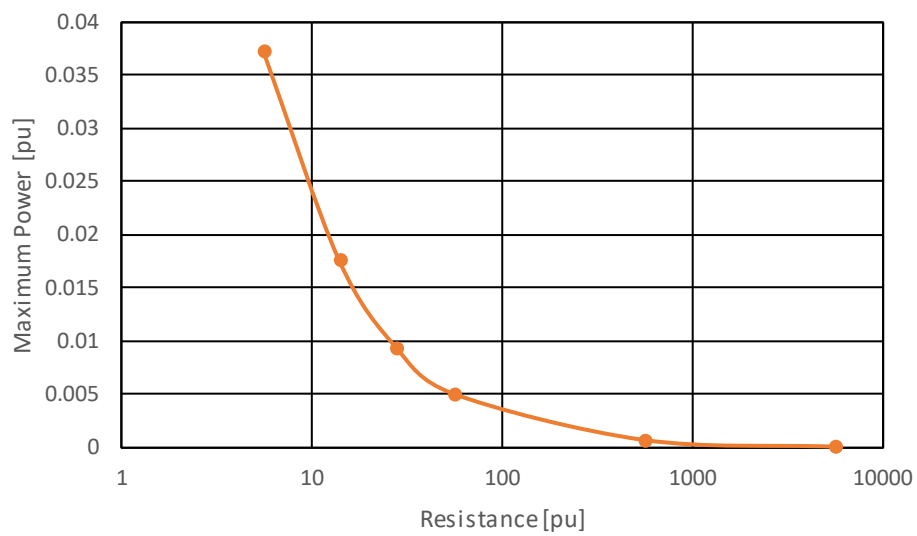


図 4 - 19 抵抗の消費電力最大値

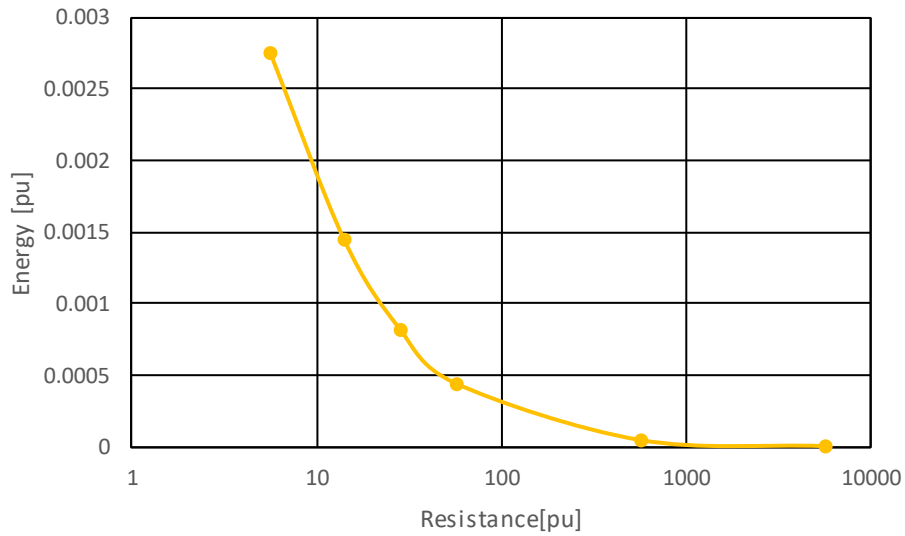


図 4 - 20 抵抗の処理エネルギー

4.5 設計手法のまとめ

本章で検討した設計手法を整理すると表 4 - 3、表 4 - 4 のとおりとなる。

表 4 - 3 検討すべきインダクタンス条件

検討すべき条件	得られるインダクタンスの条件
① 直流片側地絡時の三次高調波電流は設計値（本検討では 0.01pu）以下か	下限値
②接地リアクトルのインピーダンスは，対地浮遊キャパシタンスに対して設計値（本検討では 10 倍）以上か	下限値
③接地リアクトルと対地浮遊キャパシタンスの共振周波数は設計値（本検討では基本波の 0.5 倍）以下か	下限値 (本検討では①～③の中で一番厳しい条件)

表 4 - 4 検討すべき抵抗値の条件

検討すべき条件	得られる抵抗の条件
①接地リアクトルの抵抗値はバルブ冷却配管を通しての漏れ抵抗に対して設計値（本検討では 0.01pu）以下か	上限値
②鉄心入り（飽和特性あり）リアクトル（本検討では VT にて検討）を使用した場合、直流事故発生時のリアクトル電流は設計値以下か（本検討では 0.01pu 以下）	下限値

4.6 結言

本章では、自励式 BTB システムの接地方式の比較検討を行ったうえで、重畳三次高調波に対して高インピーダンスかつ直流に対して低インピーダンスとなる変圧器の変換器側中性点接地リアクトルによる接地方式を提案し、その設計手法、小型化方法について論じた。結果は以下にて要約される。

- (1) 中性点接地リアクトルは、直流端子地絡時で直ちに直流短絡とならないとともに、正負直流電圧のアンバランスがほとんど発生しないことを示した。
- (2) 三次高調波に対するリアクタンス、浮遊キャパシタンスを介しての三次高調波に対するインピーダンス、浮遊キャパシタンスとの共振次数を避けるためのインダクタンス条件、よりインダクタンスの下限値を定めた。
- (3) 大地漏れ抵抗より接地抵抗値の上限値を定めた。
- (4) 更に、実用化に際し、直列抵抗を接続することにより鉄心入りリアクトルの適用が可能であることを示し、接地抵抗値の範囲を定めた。

参考文献

- [1] J. Dorn, H. Huang and D. Retzwann: “Novel Voltage-Sourced Converters for HVDC and FACTS Applications” CIGRE Osaka Session 314 (2007)
- [2] J. Dorn, H. Gambach, J. Strauss, T. Westerweller and J. Alligan: “Trans Bay Cable - A Breakthrough of VSC Multilevel Converters in HVDC Transmission” Cigre 2012 San Francisco Colloquium Session B4-8 (2012)
- [3] 米沢 比呂志, 佐藤 正, 有塚 智彦, 中村 文則: 「GCT サイリスタを適用した大容量自励式 BTB システム」平成 9 年電気学会 B 部門大会, 620, pp. 1024-1025 (1997)
- [4] K. Sharifabadi, L. Harnefors, H. Nee, S. Norrga and R. Teodorescu: “Design, Control, and Application of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission Systems 1st Edition”, Wiley - IEEE, pp.236 (2016)

- [5] Working Group B4.48 : “Components Testing of VSC System for HVDC Applications” , CIGRE TB447, pp.21 (2011)
- [6] Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules, IEC Standard 60071-1 9th Edition (2019)
- [7] 永井 信夫, 小林 三佐夫 : 「酸化亜鉛形避雷器」, 電学誌, Vol. 100, No. 6, pp. 515-521 (1980)
- [8] S. Denetiere, S. Nguereu, H. Saad, J. Mahseredjian : “Modeling of Modular Multilevel Converters for the France-Spain link” , Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST2013) in Vancouver (2013)
- [9] IEEE Standard of Common Requirements for High Voltage Power Switchgear Rated Above 1000 V, IEEE Standard C37.0.11 (2005)
- [10] 山田 正人, 廣瀬 昌弘, 色川 浩之, 山内 四郎, 瓦井 久勝 : 「脱イオン冷却水系金属継手の流電腐食」, 平成 7 年電気学会全国大会, 1379, pp. 137 (1995)
- [11] Voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission - Electrical testing, IEC Standard 62501 Edition 1.2 (2017)

第5章 結論

再生可能エネルギー利用発電の比率拡大に伴い、電力系統用大容量変換器のニーズが高まっている。電力系統用大容量変換器へのモジュラー・マルチレベル変換器(MMC: Modular Multilevel Converter)の適用を考えた場合、その実用化には、制御上の課題、各SM(SubModule)の直流コンデンサが独立していることに起因した課題、SMが多数直列接続されることにより直流電圧が高電圧となることによる課題があった。これらの課題を解決するため、系統安定化制御の検討、工場試験ならびに現地試験方法の検討、BTB(Back-To-Back)システムの接地方式について検討し、装置による実用化、もしくは実用化のための設計手法の成果を得ることができた。以下に成果を要約する。

第1章では、本研究の背景として、世界の再生可能エネルギー発電の動向とその結果発生する諸問題を検討し、解決策としてのMMC方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に際しての検討課題を導出した。また、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、MMC方式STATCOM(STATIC synchronous COMPensator)における系統安定化に関して、AC-AVR(AC-AVR:AC-Automatic Voltage Regulator)制御系の設計方法を検討した上で、弱小系統接続時の自動ゲイン変更制御、単独系統移行時の待機時間制御についても検討し、リアルタイムシミュレータ試験ならびに装置を用いた現地試験で所望の効果が得られることを明らかにした。

第3章では、MMC方式STATCOMにおける、交流電力系統への影響が小さい工場試験方式ならびに現地試験方式について検討し、工場での通電試験ならびに装置を用いた現地試験にて所望の試験が可能であることを明らかにした。

第4章では、MMC方式BTBにおける、直流地絡発生時に直流短絡に至らない接地方式ならびにその回路定数の条件について検討し、変圧器の変換器側中性点に鉄心入り接地リアクトルと直列接続抵抗を用いた実用化設計手法を提案し、瞬時値解析によりインダクタンス条件ならびにとり得る抵抗値の範囲を明らかにした。

以上により、MMC方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に際して、制御面の課題については、MMC方式STATCOMの弱小系統接続時のAC-AVR制御系の安定性を評価したうえで、自動ゲイン変更制御を検討し、リアルタイムシミュレータ試験ならびに実用化装置を用いた現地試験で所望の効果が得られることを明らかにした。また、直流コンデンサが独立していることに起因した課題については、単独系統移行時の待機時間制御についても検討し、リアルタイムシミュレータ試験ならびに装置を用いた現地試験で所望の効果が得られること

を明らかにするとともに、交流電力系統への影響が小さい工場試験方式ならびに現地試験方式について検討し、実用化装置を用いた工場試験ならびに現地試験結果より、所望の試験が可能であることを明らかにした。また、直流電圧が高電圧化されることによる課題については、BTB 構成において、直流地絡発生時に直流短絡に至らない接地方式ならびにその回路定数の条件について検討し、変圧器の変換器側中性点に鉄心入り接地リアクトルと直列接続抵抗を用いた設計手法を提案し、瞬時値解析によりインダクタンスならびに抵抗値のとり得る条件を明らかにした。結果、MMC 方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に関する制御面、試験面、接地面での課題を解決し、実用化装置に寄与することができた。

MMC 方式電力系統用大容量変換器の実用化に関しては、今後再生可能エネルギー利用発電の増加にともない、需要が増すと考えられる HVDC (High Voltage DC transmission) への適用を目指して、以下が今後の課題である。

- ・HVDC に適用した場合、直列接続される SM 数が数倍となる。このため、制御盤集約での制御・保護・運転継続方式には限界があり、階層的構造の制御・保護方式が必要となる。また SM との通信も、多数の光ファイバ接続が必要となり通信・配線の負荷の軽減が望まれる。このように SM 数が増えた場合の制御・保護回路・運転継続方式、通信方式の検討が課題である。

- ・HVDC に適用した場合、直流送電ケーブルもしくは架空線での短絡事故は避けられない。また、直流電圧がより高圧化されるため、短絡事故時の事故電流対策も必要である。直流短絡事故発生時の SM 保護を可能とする主回路方式、保護制御方式の検討が課題である。

- ・高効率化のために、低スイッチング周波数化が望まれる。しかしながら、MMC 方式では、SM ごとに直流コンデンサが独立しており、スイッチング周波数を低くすると直流コンデンサ電圧の制御性能が低下する。直流コンデンサ電圧制御の性能を保ちつつ、損失を低減するスイッチング方式の検討が課題である。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，適切なお指導とご指摘を頂きました大阪大学大学院工学研究科 高井重昌教授に深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり，貴重なご指摘を頂きました大阪大学大学院工学研究科 舟木剛教授，牛尾知雄教授，阪部茂一招聘教授，大阪大学レーザー科学研究所 白神宏之教授に深く感謝の意を表します。

本研究の全過程を通じて，終始懇切なお指導とご鞭撻を賜りました，大阪大学 伊瀬敏史名誉教授に謹んで深く感謝の意を表します。

そして，大阪大学大学院電気電子情報工学専攻 伊瀬研究室の皆様にはご支援，ご教示をいただきました。ここに深く感謝いたします。

本研究成果の大部分は，著者の属する三菱電機系統変電システム製作所において得られたものです。本研究を進めるにあたり，多大なるご助言，ご支援頂きました，三菱電機株式会社 松本哲也プロジェクトグループマネージャー，貞國 仁志グループマネージャー，南部雅彦専任，寺本仁志専任，河野良之博士，松田明洋グループマネージャー，菊地健専任，山中大輔氏，大西亮太専任，水口裕之専任，杉山浩則氏，宇田涼介専任，藤井俊行主席技師長，灘香帆専任，田畠和順専任，竹田正俊博士，東芝三菱電機産業システム株式会社 土谷多一郎技術主幹，Mitsubishi Electric Power Products, Inc Kevin Repasky氏，Bryan Buterbaugh氏，David Roop氏，Gregory Andrejko氏，Ronald Pape氏，Andrew Bailey氏をはじめとする関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

またSTATCOMの事故データ分析に際し，ご協力を頂いたMark McVey氏に感謝いたします。

本研究に関連した対外発表等

学術論文

- [1] 中村文則, 田畠和順, 大西亮太, 伊瀬敏史:「自励式 BTB システムの接地方式検討」, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 140, No. 6, pp.539-547 (2020)
- [2] 中村文則, 松田明洋, 伊瀬敏史:「モジュラー・マルチレベル STATCOM 実用化のための試験方法」, パワーエレクトロニクス学会論文誌, No. 46, JIPE-46-09, pp.1-8 (2021) 掲載予定

国際会議における発表(査読あり)

- [1] F. Nakamura, A. Matsuda, T. Tsuchiya, D. Sullivan, B. Butterbaugh and M. McVey: “MMC-STATCOM application at Dominion Energy Colington substation”, Proceedings of CIGRE-IEC 2019 Conference on EHV and UHV (AC&DC), Session 5-5, pp.1-7 (2019)

国際会議における発表(査読あり・共著)

- [1] B. Sheng, C. Danielsson, R. Neubert, J. Turunen, Y. Lan, F. Xu, H. Zhang and F. Nakamura, “Electric Test of STATCOM Valves”, Proceedings of 2016 CIGRE, Paper B4-210 (2016)
- [2] D. Sullivan, B. Buterbaugh, J. Paramalingam, F. Nakamura, A. Matsuda, D. Yamanaka and T. Tsuchiya: “Application of FACTS Devices for a Dynamic Power System within the USA”, IPEC Niigata 2018 Conference Record, 2K1-1 (2018)

特許

- [1] 田畠和順, 中村文則, 林成男:「電力変換システム」, 第 06793876, 2019 年 8 月
- [2] 中村文則, 菊地健, 山中大輔, 梶山拓也, 藤井俊行:「電力変換装置」, 第 06676229, 2019 年 3 月
- [3] 中村文則, 大西亮太, 田所通博:「電力変換システム」, 出願番号 2020565505, 2020 年 5 月
- [4] 中村文則, 菊地健, 山中大輔:「電力変換装置」, 出願番号 PCT/JP2020/036960, 2020 年 9 月
- [5] 中村文則, 河野良之, 宇田涼介:「電力変換装置」, 出願番号 PCT/JP2020/036961, 2020 年 9 月