系統連系インバータの高調波を除去できる同期コンデンサシステムに関する研究

Studies on a Synchronous Condenser System Capable of Eliminating Harmonic Distortion for Grid-Connected Inverters

1. まえがき

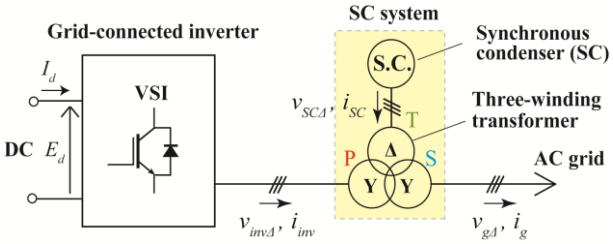
次世代の電力系統には大量の再生可能エネルギーを用いた分散電源が導入されると予想されており、種々な問題が懸念されている。一つは、電力変動が予測しにくいという問題であり、もう一つは回転型発電機が再生可能エネルギーを用いた非同期電源に置き換えることにより、系統の短絡容量や慣性力が低減する問題である。結果として次世代の系統には、多くの調整力だけでなく十分な安定度を確保するための工夫が必要となる。

これらの問題の解決策には種々なものがあるが、系統の短絡容量を増加させることができ、大容量化が比較的容易な同期コンデンサ(Synchronous Condenser : SC)を用いる手法が近年再注目されており[1]、SC に原動機を接続することにより調整力の増加も期待できる。一般に再生可能エネルギーはインバータを介して系統に接続されるが、インバータ等の電力変換器は、高調波の発生源となる。そのため、これらを大量導入することにより、多くの高調波が系統へ流出し、系統の品質が低下する問題も懸念されている。

筆者らは以上のような問題を解決することのできる一つの方法として、高調波電流を吸収できる同期コンデンサシステムを提案している。先行研究では、サイリスタインバータを同システムに接続した場合の系統電流の高調波除去効果について検討を行い、その有用性が明らかとなったが、系統連系インバータの主流は電圧型インバータ（Voltage Source Inverter : VSI）に置き換わりつつあり、他のインバータにおいてもその有用性を明らかにする必要がある。本研究では、絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ（Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT）を用いた VSI を提案システムに接続した場合の高調波除去効果について検討する。本研究では、理論的検討並びに実験的検討の双方によりシステムの高調波除去効果を確認する。まず、理論的検討に必要なシミュレーションモデルを構築し、実用規模のシステムを想定したシミュレーションにより提案装置の VSI に対する有用性を確認する。また、実験的検討に必要となる供試装置（IGBT を用いた 2kVA の VSI）の製作を行う。

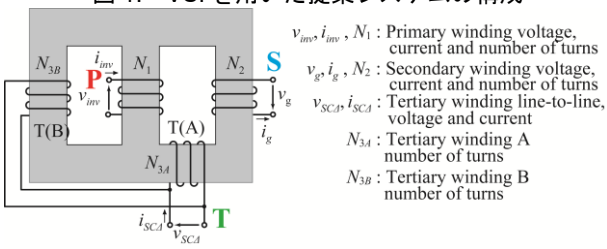
2. システム構成

図 1 に提案する同期コンデンサシステムに VSI を接続した場合の構成を示す。図示のように提案システムは、ダンパ巻線を有する SC と、負の等価インダクタンスを有する三巻線変圧器とで構成されている。同図の VSI は一台であるが、実際には一つの提案システムに対し複数の VSI を接続することができる。負の等価インダクタンスを持つ三巻線変圧器の一相分の構成を図 2 に示す。同変圧器の一次巻線（P）は VSI に接続され、二次巻線（S）と三次巻線（T）はそれぞれ系統と SC に接続される。一次巻線には VSI から高調波電流が流入し、高調波磁束が発生する。2 つあ



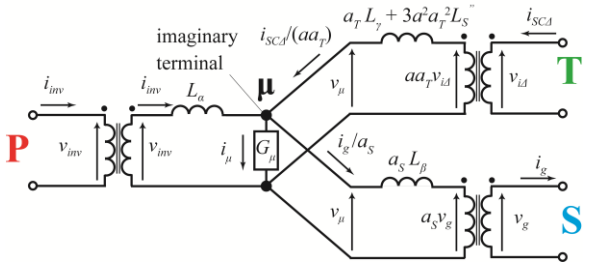
Notes – E_d, I_d: dc side voltage and current of the grid-connected inverter, $v_{inv\Delta}$, i_{inv}, $v_{SC\Delta}$, i_{SC}, $v_{g\Delta}$, i_g: line-to-line voltages and currents of the grid-connected converter, of the SC, and of the ac grid, respectively.

図 1.　VSI を用いた提案システムの構成



Notes – v_{inv}, v_g: phase voltage of the inverter output terminal and of the ac grid, $i_{SC\Delta}$: armature current of the SC (transformed from Y to delta).

図 2.　三巻線変圧器の構成（一相分）



Notes – L_α, L_β, L_γ: equivalent inductances of the transformer, L_S'': subtransient inductance of the SC, G_μ: conductance of the exciting circuit in the transformer, v_μ, i_μ: imaginary terminal μ phase voltage and current, a_S, a_T: proportional constants determined by exciting circuit of the transformer, a: turn ratio of the transformer, $v_{i\Delta}$: armature induced emf of the SC (transformed from Y to delta).

図 3.　三巻線変圧器の等価回路（一相分）

る三次巻線のうち T(B)では、同高調波磁束を打ち消すような磁束が発生し、二次巻線には高調波磁束は発生しない。その結果、高調電流は SC に吸収され、系統には流入しない。これを実現する変圧器の原理を以下で説明する。

図 3 に三巻線変圧器(図 2)の等価回路を示す。変圧器の三次側のインダクタンスは、接続する SC の初期過渡インダクタンスL_S”を打ち消すように設計されている。一方、SC にダンパ巻線が施されている場合、SC の内部誘導起電力は正弦波となることが知られている。変圧器のインダクタンスによりL_S”が打ち消される場合、図中の仮想接続点μの電圧v_μは SC の内部誘導起電力と原理的に同一となり、v_μも正弦波となる。その結果前述の高調波除去効果を実現できる。

3. 提案システムの効果

図 4 に提案する SC システムに VSI を接続した場合のシミュレーションモデルを示す。同モデルは、MATLAB/Simulink/Simscape を用いて構築したものであり、VSI には IGBT を用いている。図中の変圧器は、図 3 の等価回路をもとに構築したものであり、サイリスタインバータ接続時の検討において妥当性を明らかにしたものである[2]。図 5 に同モデルを用いて計算した変圧器各端子の瞬時値波形（上段：電圧波形、下段：電流波形）を示す。同図は実用規模の装置を想定し、実在する 300MW, 375MVA の SC のパラメータを用いて計算したものである。図より VSI の電圧波形は矩形波状になっており、VSI が効率の高い 120 度通電方式で動作していることがわかる。また、SC の電圧波形は図示のようにひずむこととなるが、系統電圧は系統を無限大母線としたため正弦波となる。一方、電流波形においては VSI が高調波の発生源となるため、VSI 側、SC 側の電流はいずれもひずんでいるが、系統側電流は正弦波となることがわかる。以上より実用規模のシステムを想定した理論的検討において、提案する SC システムは VSI を接続した場合においても十分な波形改善効果が得られることが明らかとなった。

4. 実験的検討に必要となる供試装置の製作

シミュレーション結果の妥当性を確認するためには、供試装置を用いた実験的検討を行う必要がある。提案装置は同期機、三巻線変圧器、インバータ等で構成されるので、供試装置は開発済みの同期機及び三巻線変圧器に IGBT を用いた VSI を接続したものとなる。図 6 に製作した VSI（2kVA）を示す。同装置については動作試験まで実施している。

5. むすび

本研究では、系統連系インバータの高調波電流を吸収できる同期コンデンサシステムを提案し、IGBT を用いた電圧型インバータに対する有用性を明らかにするため種々な検討を行った。

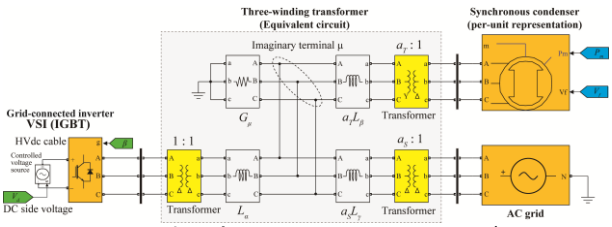
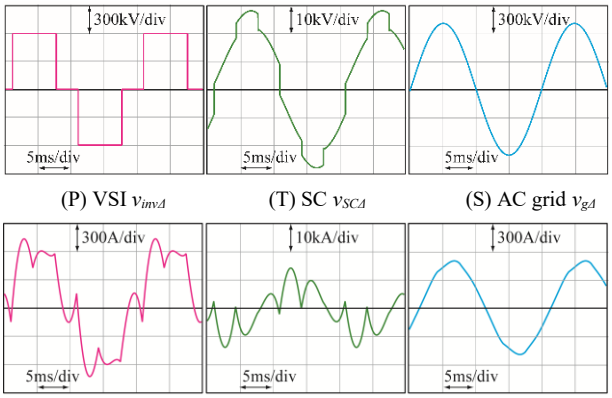


図 4. 本研究のシミュレーションモデル



Conditions: V_d = 600(kV), I_d = 500(A), $V_{gΔ}$ = 500(kV), P_g = 300(MW), Q_g = 0(var), f_g = 50(Hz)

Notes – V_d, I_d: dc side voltage and current of the grid-connected inverter, P_g, Q_g, f_g: output active power, output reactive power and frequency of the ac grid.

図 5. VSI を接続した実用規模の SC システム各部の線間電圧波形と電流波形（375MVA）

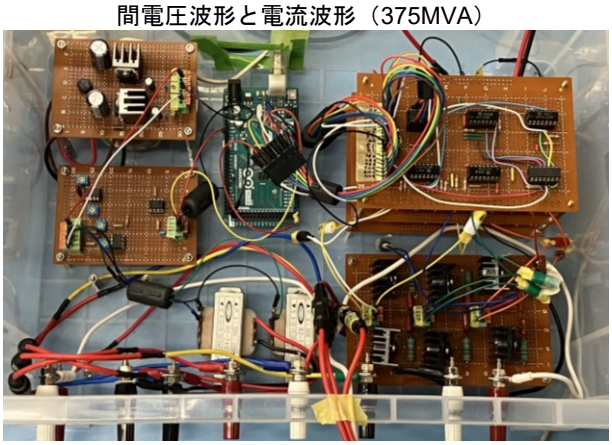


図 6. IGBT を用いて製作した供試装置（2kVA）

構築したシミュレーションモデルを用いた理論的検討により、実用規模のシステムを対象に計算した結果、電圧型インバータを用いた場合においても十分な波形改善効果が得られることが明らかになった。また、実験的検討に必要な供試装置の製作を行い、単独運転可能な IGBT を用いた電圧型インバータを完成させた。

今後残された課題として、製作した供試装置を用いた実験的検討が挙げられる。

文　献

[1] F Shixiong, H Wei, and L Lixin, “Influence of synchronous condenser exciter limit on voltage stability of HVDC” Proc. of ICIEA 2018. Wuhan, China. Jun. 2018.

[2] K. Yamashita, D. Sakamoto, and M. Tandai, “A Synchronous Condenser System Capable of Eliminating Harmonic Distortion for Grid-Connected Inverters,” Proc. of ICEMS 2021, Gyeongju, Korea, Republic of, Nov. 2021.