



次世代送電網の実現を目指して

赤木 泰文 研究室～電気電子工学専攻



ひろふみ
赤木 泰文 教授

エネルギーの安定供給や低炭素社会の実現のため、政府は太陽光発電の普及拡大を目指している。具体的には、導入量を2020年までに現状の20倍程度にすることを目標に掲げている。

そのためには、発電量が大きく変動する太陽光発電の大規模導入に耐えられる送電網の実現が必要不可欠であり、現在、次世代送電網を整備する国家プロジェクトが目下進行中である。赤木先生は、そのプロジェクトで電圧の安定化と電力の過不足の解消を目的とした無効電力制御装置と電力貯蔵装置の研究開発を担っている。



スマートグリッドの必要性

現在、日本国内における総発電量の約6割は火力発電が占めている。しかし、火力発電は減らしていく必要がある。石油や天然ガスなどの化石燃料は埋蔵量に限りがあり、火力発電のコストが今後増加していくと予想されるからだ。さらに、地球温暖化防止のため、世界的に二酸化炭素の排出量を抑制しようとする動きもある。そのため、化石燃料を用いず、二酸化炭素の排出もない太陽光発電や風力発電など、自然エネルギーを利用した発電方法が注目されている。

しかし、太陽光発電や風力発電にもデメリットが存在する。これらの発電方法は、発電量が気象に大きく左右され、自由に制御できない。例えば太陽光発電の場合、晴れている日には発電量が過剰になり、曇っている日には逆に発電量が不足するという事態が起こりうる。

電力が余ったり不足したりすることは大規模停電を引き起こす原因となる。現状でも、電力の需要量は時間帯によって差があるため、電力の過不足が起らないよう電力を調整する必要がある。

現在は、発電量を調整することで電力の過不足を防いでいる。実際には、小規模な火力発電所や

水力発電所などで発電量の調整を行っている。原子力発電所や大規模な火力発電所は効率を重視し、一定の運転を行うため、発電量を制御しないからだ。

しかし、発電量が不安定な太陽光発電や風力発電が大規模に送電網に導入されると、現在の方法では発電量を調整し切れなくなってしまう恐れがある。これによって、実際に電力が余ったり不足したりすると、次のようなことが起こる。

電力が余ると、発電所にある発電機の回転数が増加するということが起こる。原子力発電所や大規模な火力発電所の発電機は非常に大型であり、その上、高速で回転している。よって、わずかに回転数が増加しただけでも遠心力が大きく増加してしまう。これらの大型の発電機は無駄を省くため、厳密に設計されており、遠心力の増加はすぐさま故障の危険につながる。これを防ぐため、発電機を緊急停止させる必要があり、大規模停電を引き起こしてしまう。

電力が不足すると、先程とは逆に、発電機の回転数は減少する。すると、発電機の運転を維持するだけの回転数が得られなくなる。この状態が数

分間続くと、発電機が止まってしまう、電力余剰の場合と同様に大規模停電に陥ってしまう。

このように、大規模発電所の発電機にとってはわずかな電力の過不足が問題につながるので、電力の調整がより重要となる。

また、太陽光発電の大規模な導入に伴う電力の過不足は、送配電電圧にも多大な影響を与える。送配電電圧が不安定になると、電気・電子機器の動作が不安定になり、最悪の場合は機器の故障につながる。現在でも送配電電圧はある程度変動し

ているが、将来太陽光発電の大規模導入が行われると、さらに変動幅が大きくなってしまう。よって、電圧制御がより重要になってくる。

以上のような電力調整と電圧制御の問題の解決を目指す新たな送電網の開発が望まれており、現在国家プロジェクトとして進行している。この送電網をスマートグリッドという。スマートグリッドを実現させるためのプロジェクトの中で、赤木先生は新方式の無効電力制御装置と電力貯蔵装置の研究開発を担っている。

仕事をしない電力で電圧を制御する

まず、電圧の制御方法について説明する。一般に、電圧の制御では無効電力を利用している。無効電力とは、電圧と無効電流の積で表される、仕事をしない電力成分のことであり、無効電流とは、電流の位相が電圧の位相と比べて $\pi/2$ ずれている電流のことである。ここで、電流の位相が電圧の位相よりも $\pi/2$ 進んだ電力成分を進み無効電力といい、逆に $\pi/2$ 遅れたものを遅れ無効電力という。

送配電の過程で、進み無効電力が発生すると電圧は上がり、遅れ無効電力が発生すると電圧は下がる。また、電圧の変動幅は無効電力の大きさに比例する。これらのことから、無効電力を適切に調整すると、無効電力による電圧変動で、送配電する際に生じた電圧変動を打ち消すことができる。ここで、無効電力を調整するための装置が無効電力制御装置と呼ばれるものである。先生が研究の対象としている無効電力制御装置は、送電網の末端に設置する装置である。

実際に、どのようにして無効電力制御装置で電圧を制御しているのかを説明しよう。まず、従来方式の制御法について述べる。従来方式では、図1のような回路を用いて無効電力を制御する。電流はコンデンサを流れると、電圧の位相に対し位相が $\pi/2$ 進み、コイルを流れると逆に $\pi/2$ 遅れる。つまり、コンデンサとコイルを用いることで電流の位相を変えることができる。また、複数のコンデンサやコイルを並列させ、電気容量やリアクタンスの大きさをスイッチで変えることができるようにすると、無効電流の振幅も変えることができるようになる。このように、スイッチを必要

に応じてオン・オフすることで、無効電流の位相と振幅を調整できる。

しかし、この方式には主な問題点が二つある。一つ目は、電圧制御の自由度が低い点である。この方法は、複数台のコンデンサやコイルを並列させることで電気容量やリアクタンスの大きさを変えているので、あくまで段階的にしかそれらの大きさを変えられない。そのため、電圧の変動幅も段階的にしか変えることができない。

二つ目は、装置の体積と重量が増加する点である。細かい電圧制御をするためにはコンデンサやコイルが多数必要となる。高電圧・大電流に耐えられるコンデンサやコイルは大型で重いため、装置全体が重くなってしまう。その上、電力は三本の配電線を用いて送られるため、図1の回路を各配電線に設置することが必要となり、装置全体と

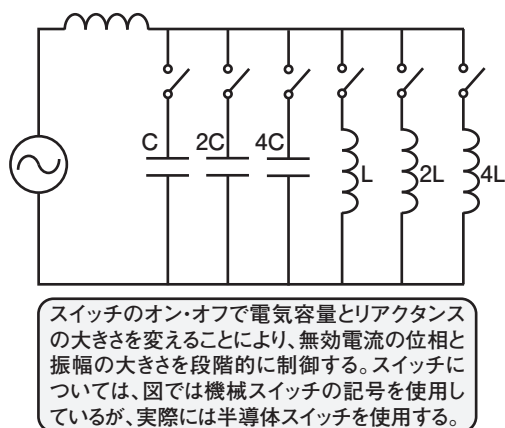


図1 従来方式の無効電力制御装置

してさらに大掛かりなものになってしまう。

これらの問題を解決するため、先生は新方式の無効電力制御装置を開発した。従来方式では、多数のコンデンサとコイルを用いていたが、新方式では、PWM(Pulse Width Modulation)コンバータという変換器を用いる点が異なっている。PWM コンバータは交流電圧や直流電圧をパルス波に変換する機器である。また、PWM コンバータを適切に制御することで、パルス波から直流電圧や交流電圧を発生させることもできる。

新方式の装置では、パルス波を都合のよい位相と振幅をもつ正弦波に近づけるために複数のPWM コンバータを用いている。こうしてできた波形を疑似正弦波と呼ぶ。図2上は PWM コンバータを一台だけ用いた場合の交流電圧波形であり、その波形はパルス波となっている。図2下は複数台の PWM コンバータを用いた場合の交流電圧波形であり、その波形は疑似正弦波となる。PWM コンバータを多く使用するほど、電流に対する交流電圧の位相や交流電圧の大きさをより細かく制御できるようになる。

また、新方式では配電線に図3のように無効電力制御装置を複数台設置し、それらを協調させて制御することにより、段階的にしか制御できなかった従来方式に比べ、連続的な無効電力の制御ができるようになった。

新方式の利点は他にもある。PWM コンバータは構成が単純で小型・軽量であり、複数台縦に並

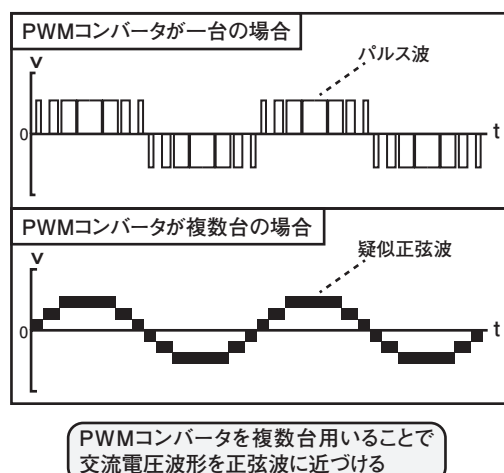


図2 PWM コンバータの交流電圧波形

べることができるため、新方式の装置はコンパクトであるという点だ。しかも変圧器を使用せず、装置全体としても軽量なので、電柱の上に設置することが可能になる。そのため、無効電力制御装置の設置場所に困ることはない。

さらに、制御に対する応答が速いというメリットもある。これは、スイッチのオン・オフの制御に絶縁ゲートバイポーラトランジスタと呼ばれる最新の半導体デバイスを用いているためである。これにより、無効電力の高速制御も可能になった。

以上のように、先生が研究している新方式では、電圧制御の自由度が低いという問題点と、装置の体積と重量が増加するという問題点が解消され、さらに無効電力制御の高速化にも成功した。

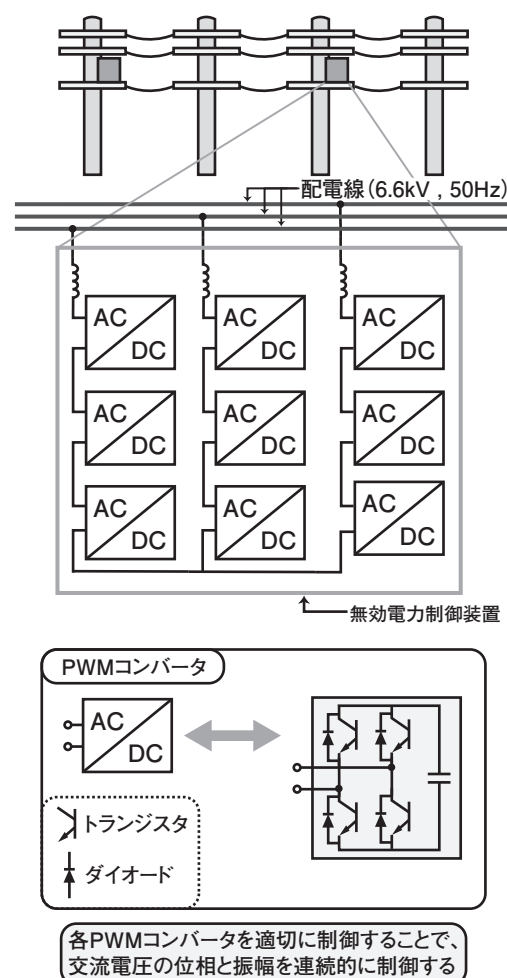


図3 新方式の無効電力制御装置



電力の銀行－電力貯蔵装置－

次に、電力の制御方法について説明する。将来、太陽光発電などを大規模に導入した場合、先に述べたように発電量と需要量の不均衡が問題になってくる。この問題を解決する手段として、電力貯蔵装置を用いることが考えられている。この装置は、発電量が需要量を上回るときは充電し、電力の発電量が需要量を下回るときは放電することで電力の過不足に対応する。赤木先生は新方式の電力貯蔵装置の研究開発も行っている。

まず、電力貯蔵装置を用いた一般的な電力調整の方法について説明しよう。電力調整の際に用いる電力貯蔵装置はPWMコンバータを内蔵している。電力が余ったときは、PWMコンバータで交流から直流に変換して二次電池に充電し、逆に電力が不足したときは、二次電池に貯めておいた電気エネルギーを直流から交流に変換して放電する。電力は電圧の位相が進んでいる方から遅れている方へと移動するので、充電するときは、電力貯蔵装置側の電圧の位相を配電線側の電圧の位相より遅らせ、逆に放電するときは、電力貯蔵装置側の電圧の位相を配電線側の電圧の位相より進ませればよい。

従来方式の電力貯蔵装置は、二次電池を組み合わせたものである組電池三個を直列にし、それを三つ並列にしたものをPWMコンバータにつないだシンプルな構造をしている(図4)。この方式だとPWMコンバータは一台しか使わない。

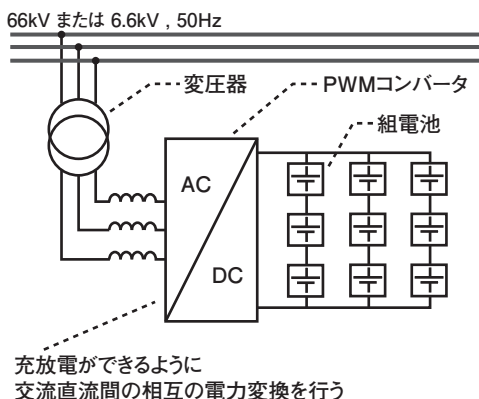


図4 従来方式の電力貯蔵装置

従来方式の電力貯蔵装置を稼働させる場合、主に二つの問題が生じる。一つ目は、高調波成分の問題である。従来方式の場合、PWMコンバータの交流電圧波形は、PWMコンバータを一台しか用いていないため、図2上のように正弦波と比べて形が大きくずれている。この実際にできた波形と正弦波とのずれの部分を高調波成分という。高調波成分は電気機器が誤作動する原因となる。

二つ目は、システムの信頼性の問題である。従来方式の場合、ある組電池が故障すると、列によって正常な組電池の個数が異なってしまうので、列間の電圧も異なってしまう。そのため、組電池が一台故障すると、その列に流れる電流が他の二列と比べ、大きくなってしまふ。そこで、過剰な電流による装置の故障を防ぐため、組電池が壊れた時点でその列を遮断する必要がある。その結果、装置中の組電池が一台故障しただけで装置の制御能力が本来の3分の2まで一気に落ちてしまう。

これらの問題を解決するために先生が提案する新方式の電力貯蔵装置は、組電池それぞれにPWMコンバータをつけた構造をしている(図5)。図5の網掛け部をユニット、点線部をクラスタと呼ぶ。クラスタを三本の配電線の各線にそれぞれつけ、ユニットそれぞれを適切に制御することで交流電圧波形を図2上と比べ、図2下のように正弦波により近づけることができるので、従来方式と比べ、高調波成分を格段に抑制することができるようになった。

また、この新方式では同クラスタ内にユニット一個分を予備として余分に設置している。これによって、図5の同クラスタ内にある上の三つのユニットのうち一つが壊れたとしても、壊れたユニットの部分が一番下にある予備のユニットにつなぎかえることで、運転を中止せず継続することができるようになる。

新方式では、組電池が充放電する電力を個別に制御できるので、同クラスタ内のユニットが二つ同時に壊れてしまったとしても、制御能力は本来の9分の8までしか落ちない。このように、従来方式では一つが壊れるとその列が全て使い物にならなくなったが、新方式はそれを回避できるよう

な構造にすることで、電力貯蔵システムの信頼性の向上に成功した。

以上が先生の研究開発した新方式の無効電力制御装置と電力貯蔵装置の概要である。将来的に、新方式の電力貯蔵装置をスマートグリッドだけでなく、電気自動車や産業用モータ制御などに応用する研究も行っている。

現在、新方式の無効電力制御装置と電力貯蔵装置の実証試験が計画されている。この実証試験は、先生の研究成果をベースとして、これらの装置の実機モデルを設計・製作し、送電網の末端に接続して種々の運転性能を評価するもので、スマートグリッド実現プロジェクトの目玉でもある。これは、日本のパワー半導体デバイスと回路・制御を駆使した最先端パワーエレクトロニクス技術の実証試験でもある。

スマートグリッドの技術を、日本国内だけににとどまらず、外国に輸出していくことが期待されている。スマートグリッド実現プロジェクトの今後の動向に注目したい。

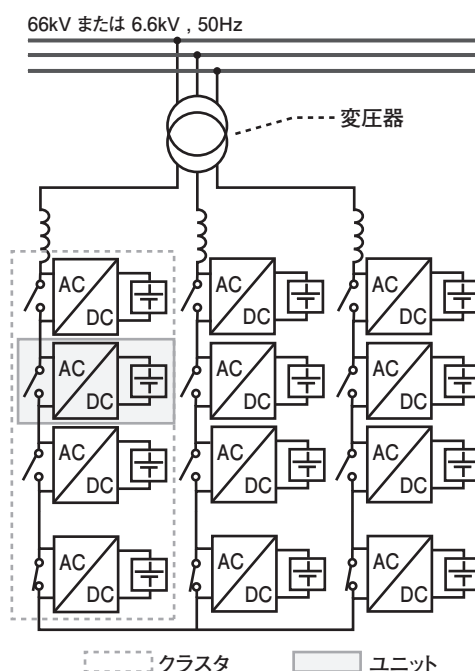


図5 新方式の電力貯蔵装置

💡 多岐にわたる研究内容

本稿で紹介したのは、電力変換器の送電網への応用に関する研究だが、赤木先生は他にも電力変換について実用的な研究を行っており、プラントや工場、発電所などで使われる高圧大容量可変速モータの省エネルギー化に関連した研究も行っている。先生が長岡技術科学大学在職中に、当時所属していた研究室の教授と連名で発表した3レベルインバータは、発表の10年後から実用化が始まり、最近では東海道新幹線の最新車両（N700系）にも主電動機駆動用インバータとして使用さ

れている。

赤木先生は、このような実用的な研究だけでなく理論的な研究も行っている。なかでも1983年に発表した「三相回路の瞬時無効電力理論」は、現在では世界の研究者や技術者から「pq理論」とも呼ばれており、海外では大学院の講義でも取り上げられている有名な理論である。

このように、赤木先生が行っている研究は実用的な研究を中心としつつ理論的な研究も行うなど多岐にわたっているのである。

私はパワーエレクトロニクスに以前から興味をもっていましたが、具体的にどういうものであるのかは存じませんでした。そんな私にとって、先生から伺ったお話は大変興味深いものでした。

赤木先生には、無効電力制御装置と電力貯蔵装置について、学部一年生で専門知識の乏しい私にも理解できるようにやさしく説明していただきました。中には難解な内容もありましたが、その部分については先生のご協力もあり無事解決するこ

とができました。また、記事に関係する内容以外にも、興味をひかれるようなお話も多くしていただきました。

お忙しい中、度重なる取材や質問に快く応じてくださるなど、赤木先生には多大なご尽力をいただきました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。赤木先生のより一層のご活躍をお祈りいたします。

（久持 裕史）