

電力供給設備の高度化による 省エネ技術

久水 泰司
電力技術研究部
(き電 主任研究員)

小西 武史
同
(同 副主任研究員)



ひさみず やすじ こにし たけし

はじめに

我が国の電気鉄道では、直流電化方式と商用周波数を用いた交流電化方式が採用されています。本稿では、電気鉄道における省エネルギー技術として、直流電気鉄道では、回生ブレーキ使用時の電力の有効活用に関する省エネルギー技術について、交流電気鉄道では、静止形無効電力装置およびルーフ・デルタ結線変圧器による省エネルギー技術について紹介をします。

直流電気鉄道における省エネルギー技術

1. 電力回生車

近年の直流電気鉄道の電車では、ブレーキ時に電力を発生させて他の電力消費箇所に送電することでブレーキ力を得る「電力回生車」が主流となっています。ところが、電力消費箇所がその電車の付近に存在しないと、送電する相

手がないため必要なブレーキ力を得ることができなくなります。また、せっかく発生させた電力(回生電力)を活用することができなくなるということは、エネルギー効率を低下させることにつながります。そこで、ブレーキ時に発生する電力をできるだけ有効活用することが可能な回生インバータや自励式整流器、電力貯蔵装置を導入することが検討され、実用化が進められています。以下、それぞれの特徴について紹介します。

2. 回生インバータ(他励式インバータ)

多くの直流電気鉄道では、電力会社から受電した三相交流を地上の変電所の整流器で直流に変換して電車に電力供給しています。整流器としては、1960年代頃から半導体素子であるダイオードを用いた「シリコン整流器」が広く用いられています。ダイオードを用いた整流器は信頼性が高いものの、交流側に電力を戻すことができないため、電力回生車による回生電力を処理することができません。これを解決する手段として導入されたのが「回生インバータ」です。一例として、サイリスタを用いた他励式インバータを図1に示します。他励式インバータの直流回路は、通常の電車に電力供給を行うシリコン整流器と並列に接続され、回生電力が生じた際に必要に応じて交流側に電力を戻します。戻された回生電力は、駅や鉄道沿線設備の電力として再利用することができるため、省エネルギー化につながります。

回生インバータは一般に低廉、低損失であり、地下鉄を中心に適用実績も豊富にあります。しかしながら、交流回路に遅れの無効電力が発生したり、大きな高調波電流が流れる場合があります。その対策として、遅れの無効電力を補償するための並列コンデンサや高調波電流を抑制するためのフィルタを設備するなど、電力品質の向上を図る必要があります。

3. 自励式整流器

前述したように、直流電気鉄道ではシリコン整流器が多

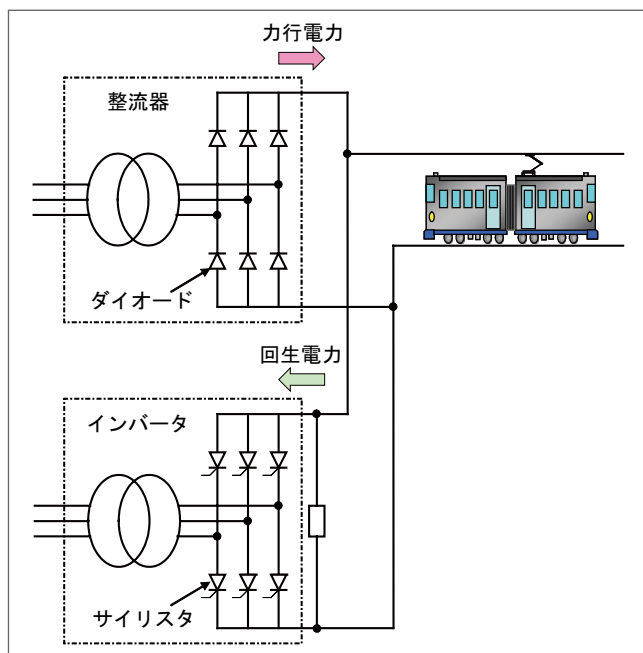


図1 回生インバータの形態

く用いられていますが、交流側に電力を戻すことができません。そこで、交流を直流に変換する機能と直流を交流に変換する機能を兼ね備える「自励式整流器」の適用により、シリコン整流器の能力に加えて回生電力を処理することも可能になります。自励式整流器の構成の一例を図2に示します。ダイオードの代わりに自己消弧機能を備えた素子 (IGBT) が適用され、直流側にコンデンサが並列に接続されます。なお、IGBTとは、「絶縁ゲートバイポーラトランジスタ」(Insulated Gate Bipolar Transistor) の略で、自励式整流器の素子として汎用的に使用されています。

自励式整流器の制御には、パルス幅変調制御 (PWM制御) が適用されます。直流電圧をパルス状の電圧に変換し、そのパルスの出力幅を制御することにより、任意の振幅値と位相を有した交流電圧を得ることができます。これにより直流から交流の電力変換が可能となり、回生電力を交流側の電力需要箇所に供給することができます。また、無効電力や高調波電流を抑制できるため、電力品質の向上を図ることも可能です。

4. 電力貯蔵装置

電力貯蔵装置は、電車が減速する場合に生じた回生電力を蓄積し、電車が加速する場合に力行電力を放出します。従って、電気鉄道の適切な箇所に電力貯蔵装置を設置すれば、エネルギー効率向上が期待できます。現在、貯蔵媒体を中心に種々の研究開発が進められています。

電気鉄道に適用する電力貯蔵装置の貯蔵媒体に要求される特性として、以下の内容が挙げられます。

- ・ 負荷の変動が急峻なため、応答性の速い充放電特性が必要

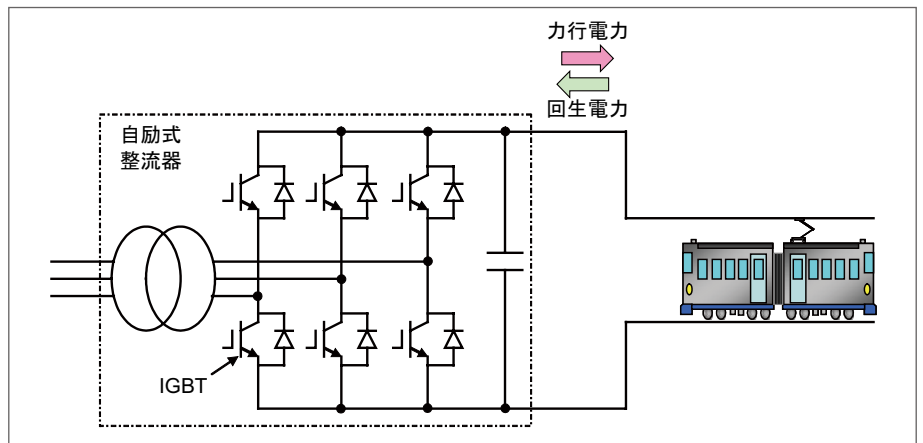


図2 自励式整流器の形態

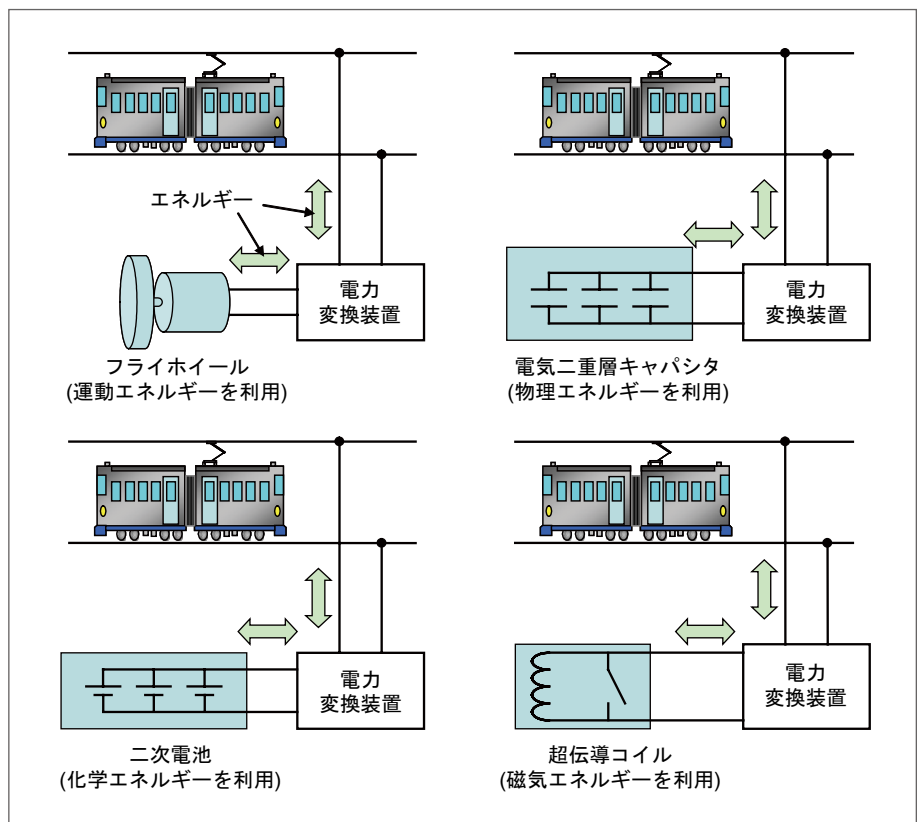


図3 電力貯蔵装置の形態

- ・ 充放電する回数が多いため、サイクル寿命の長い媒体であることが必要
- ・ 充放電する瞬時の電力が高いため、出力密度の大きな媒体であることが必要

以上の点を踏まえ、電気鉄道において回生電力の吸収が可能な方式としては、図3に示す4種類が考えられます。貯蔵媒体側と電車側の間には電力変換器を介するケースが多いことが特徴です。

電力貯蔵装置を直流電気鉄道に適用する場合、制御装置等の補助電源が確保できれば電力会社からの受電を行う必要がないため、任意の場所に設置することが可能になります。従って、電車がブレーキをかける頻度が多い場所に設置すると非常に効果的です。現在、フライホイール、二次電池、電気二重層キャパシタを用いた電力貯蔵装置については実用化されており、今後も導入が進むものと期待されています。

交流電気鉄道における省エネルギー技術

1. 交流き電回路の省エネ技術概要

交流電気鉄道の立場からみると電車は容量の大きい変動単相負荷になるため三相側の電源に電圧不平衡や電圧変動を与える可能性があります。このため、各種の電源品質の向上を目的として、無効電力補償装置が一部の変電所に設

置されています。これらを設置することにより三相交流電源に流れる電流が均等になり、線間電圧がバランスするようになります。これによる電力損失の低減は、省エネルギー化に寄与することになります。また、き電側に設置された無効電力補償装置による無効電力の低減は、き電線に流れる電流の絶対値が減少するため、熱損失が低減され省エネルギー化に寄与します。

更に、き電用変圧器は複数の電車に電力を供給しているので、電力損失を数%低減するだけでも削減効果が大きく現れてきます。最近開発されたルーフ・デルタ結線変圧器は、従来の変形ウッドブリッジ結線変圧器より鉄心および巻線が少ない構造となっているため、結果的に電力損失を低減することができるようになりました。

この他にも、上り線と下り線を接続する上下タイによって電流を分流させることで結果的に電線による熱損失を低減させることもできます。

2. 無効電力補償装置

図4に各種の無効電力補償装置(SVC)を示します。受電側に設置する方式として、変位相スコットSVC、三相V結線SVC、三相自励式SVCがあります。また、き電側に設置する方式として、M座、T座それぞれの無効電力を補償する単相SVC、M座とT座間でお互いに電力を融通して均等にする電力融通方式電圧変動補償装置(RPC)があります。これらは、受電側三相電源電圧をバランスさせるため、三相電源の品質向上、損失低減に寄与します。また、き電末端のき電区分所(SP)にSVCを設置する場合は、電圧降下を抑制することができます。さらに、図5のベクトル図が示すように、き電回路の無効電力が減少することで皮相電力が減少します。この結果、電流の絶対値が減少することで、き電回路での熱損失が低減しますので省エネルギーに寄与することとなります。

3. ルーフ・デルタ結線変圧器

図6に示すルーフ・デルタ結線変圧器は従来の変形ウッドブリッジ結線変圧器と比較して、構造的に昇圧変圧器が無いため、鉄心および巻線が少なくなり省エネルギーのき電用変圧器となります。変圧器の損失

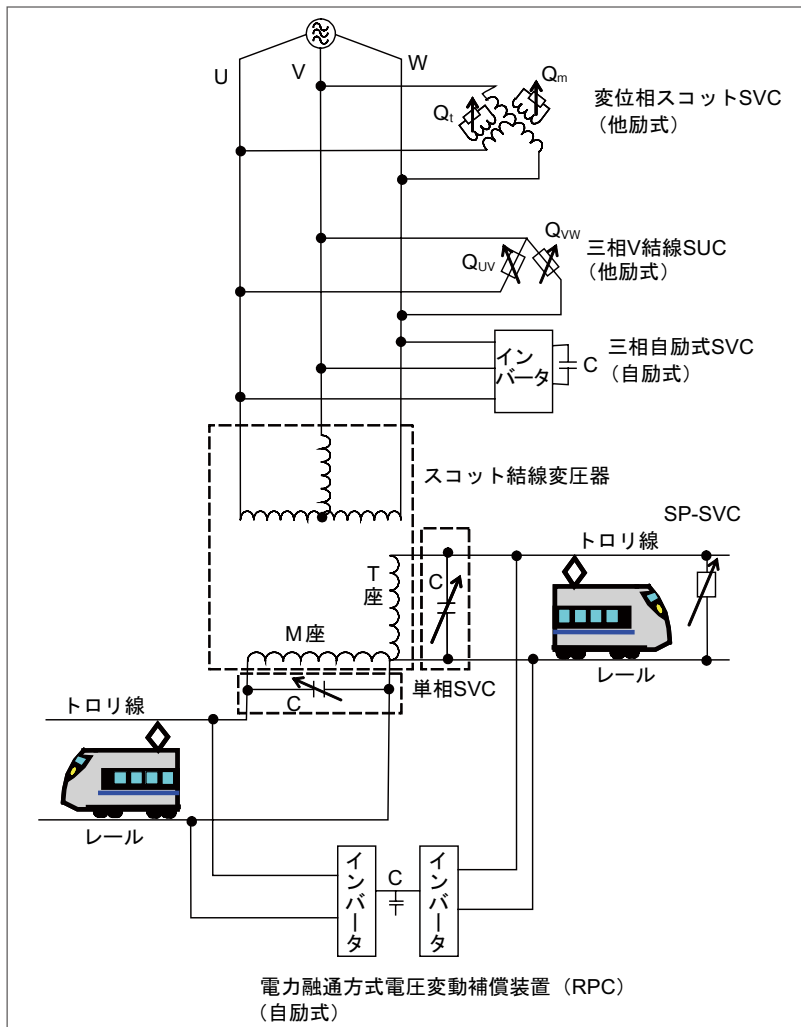


図4 各種補償装置

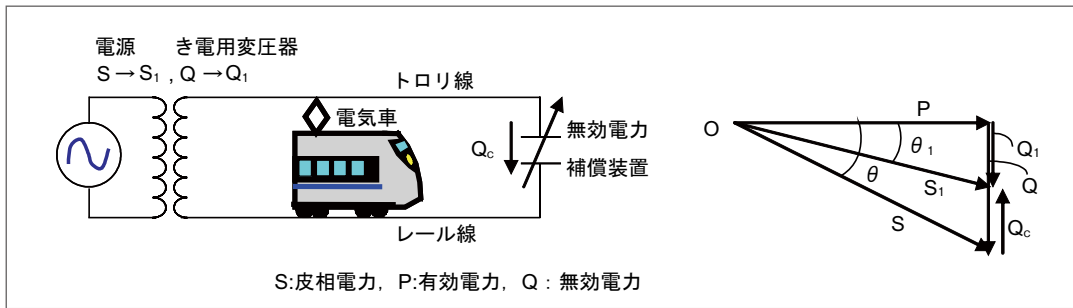


図5 無効電力補償ベクトル図

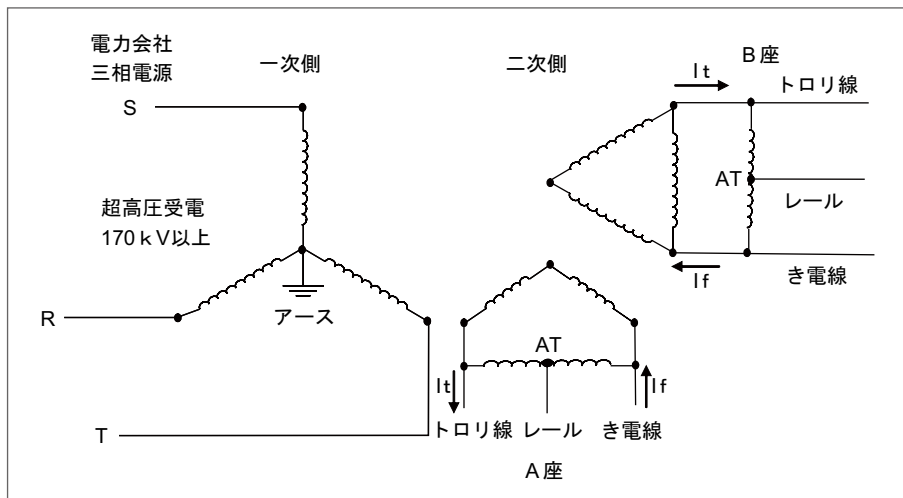


図6 ループ・デルタ結線変圧器

には鉄損と銅損があり、鉄損は負荷が無くても電圧を印可しているだけで発生するもので、主にヒステリシス損、渦電流損からなります。ヒステリシス損は鉄心に磁界を印可すると磁化特性はある点で飽和するヒステリシス曲線となり、これによるエネルギー損失となります。渦電流損は鉄心の抵抗損になります。変圧器は常時電圧が印加されているので鉄損は小さくとも時間の経過とともに大きな電力量の損失となります。一方、変圧器の銅損は、巻線の抵抗分により発生します。銅損による熱損失は、電流の2乗に比例するため負荷が大きくなると損失は鉄損より銅損が大きくなります。

4. 将来展望

交流電気鉄道では電気車からの回生電力がき電回路で消費ができなくても、電源に戻るため基本的には回生失効はありませんが、回生時に進相無効電力が発生する場合はパンタ点電圧が上昇するため、回生電力を絞込む必要が生じ、効率が低下する可能性があります。地上設備として回生電力を有効に利用する電力貯蔵装置を考えた場合、交流を貯蔵媒体に必要な直流に変換する必要があり、この変換損失

を小さくすることが回生電力を有効に利用する場合の課題となります。今後、高電圧低損失型デバイス、低コストな電力変換装置および貯蔵媒体が出現してくれば、交流電気鉄道においても電力貯蔵装置の実用化が導入される可能性がでてくるのではないかと考えられます。

おわりに

直流電気鉄道における省エネルギー技術として、回生電力を有効利用することが可能な回生インバータ、自励式整流器、電力貯蔵装置を紹介しました。車両設備や電車線設備の省エネルギー技術と併せて活用することにより、直流電気鉄道のさらなる効率化が図れるものと期待されます。また、交流電気鉄道における省エネルギー技術として、静止形無効電力補償装置を紹介しましたが、これらの装置の主目的である電源品質の向上を図ることで省エネルギー化が併せて達成できることを示しました。今後は機器損失の低減を図りながら、さらに省エネルギー化を進められる装置が現れてくるのではないかと期待しております。RRR