

ば駅から守谷駅近郊の17.25kmの区間には、その中間点に交流変電所（萱丸SS）が設置される。なお、交流電化の方式については、標準架線電圧を20kVするAT(Auto-Transformer)き電方式が採用される。

直流変電所の主器であるPWMコンバータの容量は、秋葉原変電所の3000kWを除き全て4500kWであり、各直流変電所には、こうしたPWMコンバータが2台設置される（常用1台、予備1台）。

2.2 PWMコンバータの構成

PWMコンバータの主回路構成を図2に、基本仕様を表1に示す。PWMコンバータは、使用するスイッチングデバイスの耐圧・電流容量、電圧制御性能、電源（電力会社）およびき電側に流出する高調波、制作の容易さ等を考慮して、電圧型の3相ブリッジコンバータ（コンバータユニット）を多重変圧器により直列または並列に6多重化して構成する。

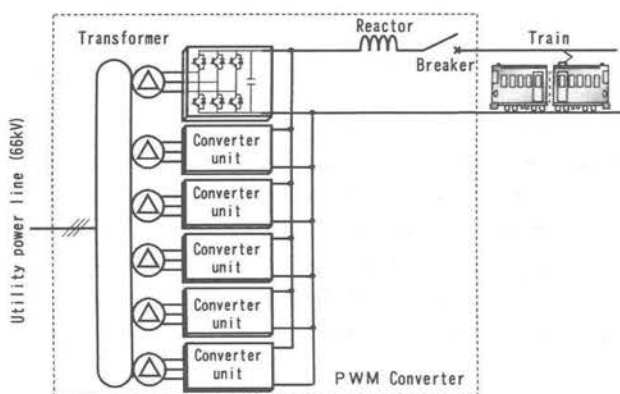


Fig. 2 Constitution of PWM Converter

Table 1. Specification of PWM Converter

Output capacity (DC side)	4,500 kW (Continuous rating)
	9,000 kW (for 2 hours)
	13,500 kW (for 1 minute)
Output voltage	1,500 V
Control performance of output voltage	1,500 V $\pm$ 7.5 V ($\pm$ 0.5%)
Output current (DC current)	3,000 A (Continuous rating)
	6,000 A (for 2 hours)
	9,000 A (for 1 minute)

スイッチングデバイスとしてはIGBT系の素子を使用し、2次冷却水の確保が困難なことから、デバイスの冷却方式としては強制風冷方式またはヒートパイプ方式を採用している。各コンバータユニットの変調周波数は450Hzであり、6多重化することで電源側に対する等価変調周波数が2700Hz（54次）となることから、高調波抑制対策ガイドラインで抑制することが義務づけられた40次以下の高調波はほとんど電源側へ流出しない。このため、交流側にフィルタ等の設備を必要としない。

一方、き電側には、変電所直下の短絡事故に対して直流高速度遮断器により確実に保護が行えるよう、事故電流の di/dt を抑制するためのリアクトルが直列に接続されている。このリアクトルは事故電流の抑制と同時にPWMコンバータからき電側に流出する高調波を抑制する効果もあるが、電気車電流が急変した際には di/dt による電圧変動

をもたらす。

3. 制御方式

PWMコンバータの制御ブロックを図3に示す。制御系は、一般的な自励式整流器と同様、受電側の無効電力補償と直流電圧制御を同時に行うもので、両制御量を総括してコンバータの交流側入力電圧指令値とする。

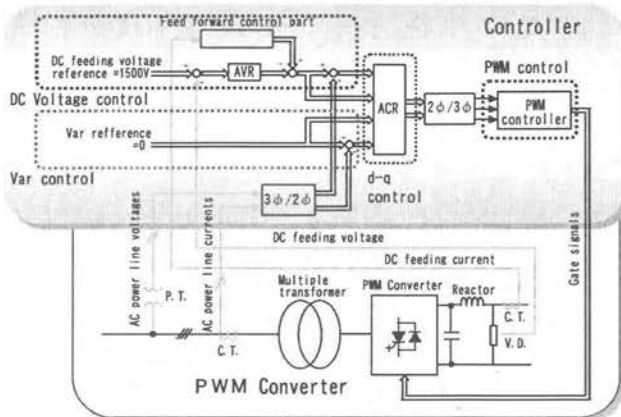


Fig. 3 Block Diagram of Control System

3.1 直流電圧制御

直流電圧制御は、基本的には目標電圧(1500V)と実電圧（き電電圧）とを比較するフィードバック制御系で構成されるが、負荷電流を検出してコンデンサ電圧を制御するフィードフォワード制御を追加することで制御系の応答速度を上げることができる。しかしながら、フィードフォワード制御を行った場合でも、電流の変化が非常に早い場合には、制御系が追従できずコンデンサ電圧を低下させてしまう。これは、リアクトルの電圧降下量の方が、コンデンサ電圧の変化量を上回ったため、こうしたことを改善するには、リアクトルのインダクタンスを小さくし、コンデンサ容量を増やす必要がある。しかしながらコンデンサ容量を増やしすぎると、リアクトルによる電圧降下を補償するのに必要なコンデンサの充電電流が増えるため、最適値を選択する必要がある。

一方、地磁気擾乱対策として、定電圧制御しなければならないのはき電電圧（直列リアクトルのき電側）であり、そのためには、き電側の電圧そのものを検出して制御するのが直接的であるが、直流コンデンサの電圧を検出してき電電圧を制御することも可能である。但し、き電電圧は、直流コンデンサの電圧と直列リアクトルによる電圧降下分を含むため、検出されたコンデンサ電圧に負荷電流に応じたリアクトル分の補償を加える必要がある。また、次節で述べるPWMコンバータと電気車との共振を抑制するためには、き電電圧を検出して制御することが有効なことから、直流電圧制御方式については、これらのことを考慮して最適な方式を決定する必要がある。

3.2 振動抑制制御

隣接する変電所間や変電所と電気車間では、PWMコンバータおよび電気車が有するリアクトルとコンデンサ、き電線のインダクタンス、PWMコンバータの制御系によりき電回路で共振が発生する可能性がある。こうした共振は、負荷電流の急変に伴う外乱に起因して発生するだけで

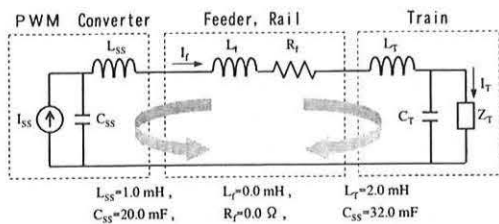


Fig. 4 Circuit Model for Resonance

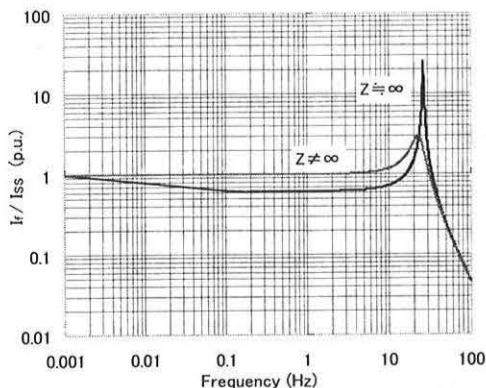


Fig. 5 Magnifying Ratio of Feeding Current

なく、無負荷時において最も顕著に発生する。図4に共振回路モデルの1例を示す。

PWMコンバータを、電流源 I_{ss} とそれに並列に接続されたコンデンサ C_s とおき、直列リアクトルおよびき電線については、それぞれインダクタンスと抵抗分とおく。一方、電気車については、PWMコンバータと等価であり、リアクトル、コンデンサ、電流源の等価回路で表すべきであるが、電流源については、便宜的に有効電力を消費するものとして抵抗分とおく (Z_T =抵抗分)。

図5に示すとおり、こうした回路には共振周波数が存在し、共振周波数付近ではPWMコンバータから発生した電流がき電線で拡大する。特にき電線の抵抗分が小さい場合や、電気車負荷が小さい場合 ($Z_T \rightarrow 小$) に著しく拡大する傾向がある。なお、共振周波数については、数十 Hz 程度と想定される。

上述した無負荷時や負荷急変時における共振を抑制するためには、フィードフォワード制御系に共振を抑制する制御要素 (例えば微分要素) を加えることが有効である。こうした制御では、共振が発生した場合に、それを抑制する電流 (電圧) を積極的に出力して振動を抑制する (振動抑制制御)。しかしながら、こうした振動抑制制御は、結果として負荷急変時の過渡的な電圧変動を増加させることから、制御系が不安定にならない範囲で抑制効果を抑える必要がある。

3.3 横流電流抑制

PWMコンバータが定電圧制御を行う限り、き電電圧の変動により電力を供給したり回生したりすることになる。これは、隣接変電所間で、制御誤差等に起因した定常的な電圧差が存在すると、無負荷時においても変電所間で横流電流が流れることを意味している。隣接する変電所間の電圧差が性能上許容される範囲 ($1500V \pm 0.5\%$) にある場合でも、数十アンペアから百数十アンペアの横流電流が流れる。地磁気擾乱対策、電力量の削減という観点に立つなら

ば横流電流は可能な限り抑制するのが望ましい。こうした、横流電流の抑制策として、図6に示すように、PWMコンバータの電力の供給・回生の境界となるき電電圧値に差を設けることが有効である。この電圧差を大きくすることは、横流電流の抑制効果を高めると同時に、回生車両の回生電力を力行車量で消費する機会を増やすことにつながるが、地磁気観測所に対する影響を考慮した場合、電圧差は30V程度にするのが望ましい。

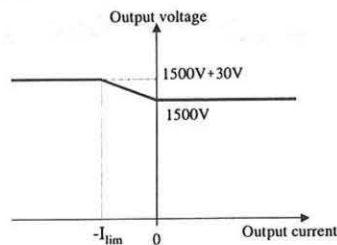


Fig. 6 Suppression Method of Circulating Current

4. 試験結果

4.1 試験の目的

き電電圧制御精度、無負荷時および負荷変動時の制御の安定性と電圧変動を検証する目的で、プロトタイプのパWMコンバータを制作し、実際に列車を走行させて試験を行った。本稿では試験結果の代表例として、負荷急変時および無負荷時の電圧制御性能および安定性、電圧変動について報告する。

4.2 プロトタイプの構成

プロトタイプのパWMコンバータの主回路構成を図7に、仕様を表2に示す。プロトタイプは、図2に示した実機と異なり4多重2並列構成となっており、出力容量は1000kW (連続) である。

一方、試験に使用した列車は6両編成であり、変電所か

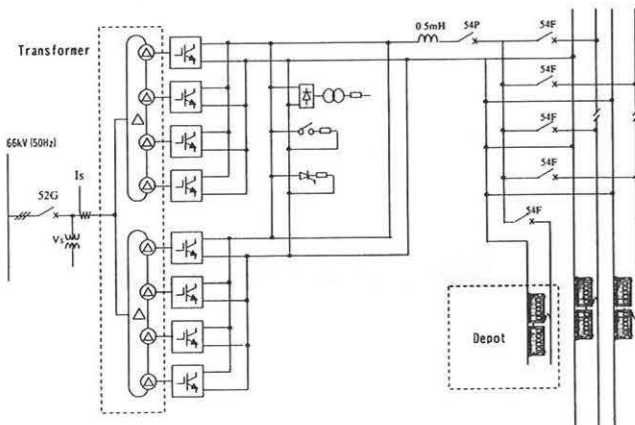


Fig. 7 Constitution of Prototype PWM Converter (1000kW)

Table 2. Specification of Prototype PWM Converter

Output capacity (DC side)	1000 kW (Continuous rating)
	4500 kW (for 1 minute)
Output voltage	1,500 V
Control performance of output voltage	$1,500 V \pm 7.5 V (\pm 0.5\%)$
Output current (DC current)	667 A (Continuous rating)
	3,000 A (for 1 minute)

ら 1.2km の間を往復走行させた。

4.3 負荷急変時の制御性能

車両が力行および回生したときのき電電圧・き電電流波形を図8に示す(54Pの点で測定)。

列車の力行電流は最大で 3000A 弱、回生電流は最大で

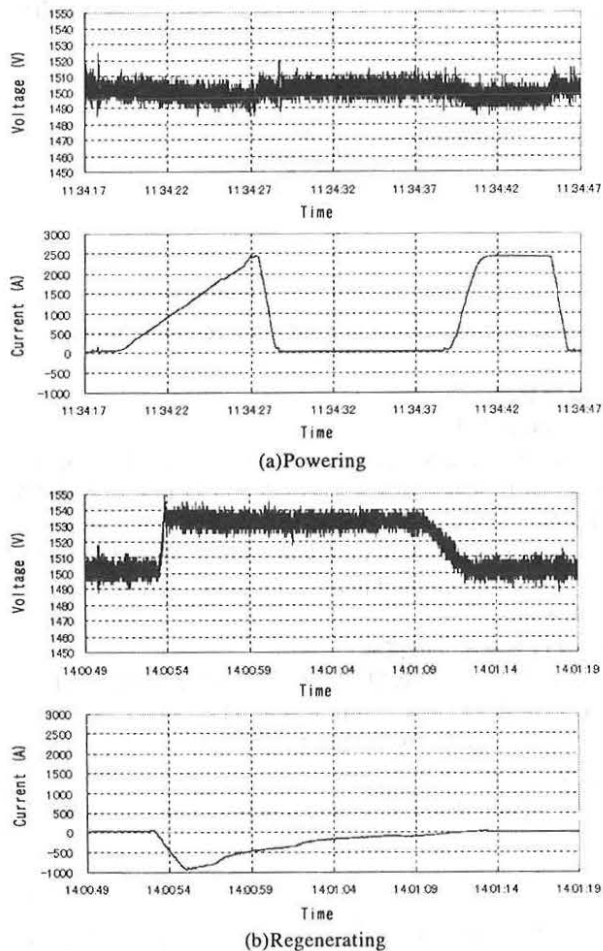


Fig. 8 Feeding Voltage and Current at Train Running

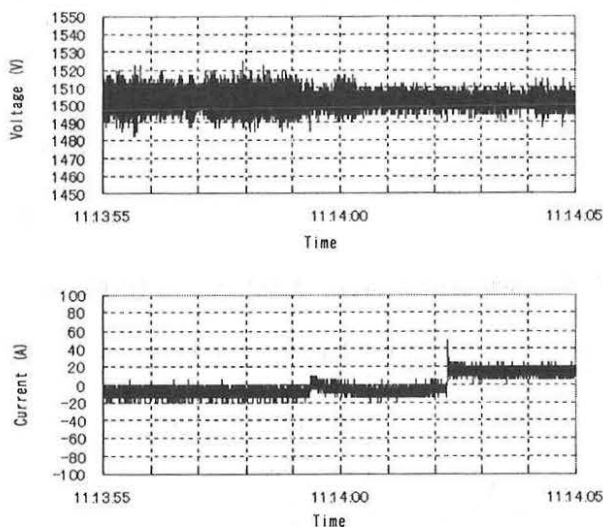


Fig. 9 Feeding Voltage and Current at HSCB (Train) Switching

1000A 強であった。図8(a)より、力行の際にき電電流が一定状態であるとき、直流電圧制御により電流の大小にほとんど関係なくき電電圧は $1500V \pm 7.5V$ ($\pm 0.5\%$) に制御されていることが確認できる。また、図8(b)より、回生の際には、横流抑制によりき電電圧は 1530V に安定に制御されていることが確認できる。

なお、力行開始時に、電気車の主電動機への突入電流に起因して電気車のコンデンサへ急激に充電電流が流れたため、PWMコンバータのき電電流が急速に立ち上がる現象が生じた。これに伴いき電電圧は低下したが、低下幅は制限値である 90V 以内(1500V の 6%以内)に抑制されている。また、電圧変化直後に 1500V に回復しており、電圧安定性に問題はない。

PWMコンバータは、電気車電流が一定の場合には電圧変動量を $\pm 0.5\%$ 以下に制御可能であり、さらに、電気車電流が急変する場合でも、その変化率が「定格電流/100msec」以下ならば過渡的な電圧変動量を $\pm 6\%$ 以下に抑えられることが確認された。また、振動抑制制御により、無負荷時および負荷急変時においても安定に動作可能であることが確認された。

4.4 無負荷時の安定性

車両が変電所直下に在線するとき、車両のパンタグラフを上げる等して(または車両の遮断器投入)無負荷時の制御の安定性について検証試験を実施した。図9に、き電電圧・き電電流波形を示す。パンタグラフを上げた瞬間もしくは車両の遮断器を投入した瞬間のき電電流の変化は 20A 程度であるが、き電電圧は 1500V 一定に制御されており、特異な振動等は発生していない。

5. 終わりに

以上、「つくばエクスプレス」の整流器として使用されるPWMコンバータの構成、仕様、制御方式について述べると同時にプロトタイプによる走行試験結果について報告を行った。以下にプロトタイプの試験結果から得られた結果を総括する。

- (1) 直流電圧制御によりき電電圧は、定常時 $1500V \pm 0.5\%$ 、負荷急変時 $1500V \pm 6\%$ 以内に制御される。
- (2) 無負荷時に相当する列車の遮断器投入直後においても電圧変動等は発生せず安定に動作する。

謝辞

プロトタイプの製作および試験にご協力をいただきました三菱電機株式会社様に謝意を表します。

参考文献

- 1) S.Hase, T.Konishi, A.Okui, etc.: "Control Methods and Characteristics of PWM Converter with Large Capacity for Electric Railway System," PCC-Osaka 2002, pp.1002, 2002.4.
- 2) 長谷, 奥井, 小西, 木下, 曾根高: 「直流電気鉄道変電所に適用する電力供給用PWMコンバータの電圧制御に関する検討」, 平成15年電気学会産業応用部門全国大会, No.3-90, pp.365-368, 2003.8.
- 3) T.Konishi, S.Hase, A.Okui, S.Kinoshita, M.Sonetaka: "Development of PWM Converter with Large Capacity for Electric Railway Substation," The Fifth IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2003.11.