

直流電車の速度制御

2021年12月 持永 芳文

1. 直流電車の駆動方式

電気鉄道は速度範囲が広く、牽引質量が変化する、線路条件により所要牽引力が変化するなどの特徴がある。また、起動時に(電動機の回転数が低い時)大きなトルクを必要とする。

このような条件を満たすものとして、長く直流電動機が使用されてきたが、電力用半導体素子として、当初のシリコンダイオードから、制御が可能なサイリスタや自励変換素子が開発されて、パワーエレクトロニクスの著しい進展により、容易に速度制御ができるようになり、軽量で保守が容易な誘導電動機が主になっている。さらに最近では永久磁石同期電動機も使用されている。

直流電動機駆動の電車では最高速度付近における電動機の回転数は 3500min^{-1} 程度であるのに対して、誘導電動機駆動の直流近郊電車では $4500\text{min}^{-1}(\text{rpm})$ 程度になり、駆動電動機の小型軽量化、通勤電車の高加減速運転が可能になった。



図 1.1 E233 系電車
(中央線・誘導電動機駆動)



図 1.2 16000 系電車
(東京メトロ・永久磁石同期電動機)

2. 直流電車の制御方式(1)(2)

直流電動機の制御には、抵抗制御、直並列制御、チョップ制御、および界磁制御などがある。今日では、パワーエレクトロニクスの発展とともに、インバータで誘導電動機を制御する方式が電気車にも用いられるようになった。誘導電動機を使用することで、①整流子やブラシがなく省メンテナンス、②主電動機が小型・軽量・堅牢などのメリットがある。

最近では誘導電動機駆動が主であり、ここでは、VVVF インバータ制御を用いた誘導電動機駆動について述べる。

(1) 誘導電動機の可変電圧可変周波数制御 (VVVF 制御)

誘導電動機の回転数は電源周波数と滑りによりきまる。誘導電動機のトルクは電動機電圧 V と電源周波数との比の 2 乗に比例するので、可変電圧可変周波数 (VVVF : Variable Voltage Variable Frequency)制御インバータを用いて、 V/f を一定に保てば、トルクは一定とすることが出来る。

a. インバータ装置

VVVF インバータ装置は、図 2.1 に示すように、電力用半導体とダイオードが並列に接続されたモジュール 3 組 (U、V、W 相) で構成されており、電力用半導体のオン、オフにより電気回路を切り替え、直流を交流に逆変換する。誘導電動機は滑りで車輪の径差を吸収できることから、一般に 1 インバータに 4 台の誘導電動機が接続されている。

半導体素子は GTO (gate turn-off)サイリスタを用いた 2 レベルインバータの時代を経て、現在は高速でオン、オフが可能な IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子を用いており、IGBT で電圧を 2 段階に加圧して 3 レベルインバータにすることで波形ひずみの改善が図られる。なお、IGBT の電圧仕様が高圧化されれば 2 レベルの回路が可能になり、最近の直流車両ではコスト低減のため 2 レベルインバータ制御になっている。最近では高温で動作する SiC (Silicon Carbide) 素子も用いられて小形化が図られている。

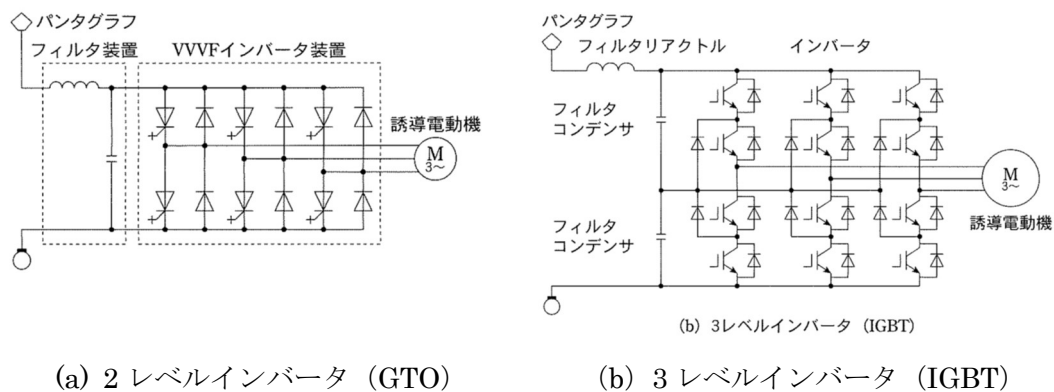


図 2.1 インバータ制御車の主回路

b. VVVF 制御

図 2.2 は VVVF インバータ装置の概略モデルであり、スイッチは半導体素子である。図 2.3 は、正弦波変調による 2 レベルの PWM (Pulse Width Modulation) 方式の原理であり、キャリア三角波と基準電圧波形を比較してスイッチング素子をオン・オフして、矩形波状の三相交流電圧に逆変換している。

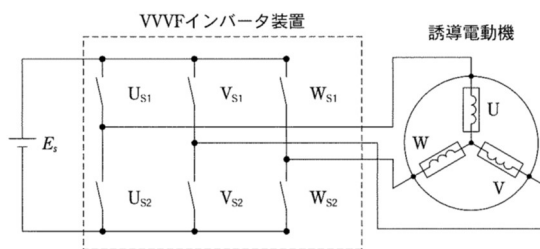


図 2.2
VVVF インバータの概略モデル

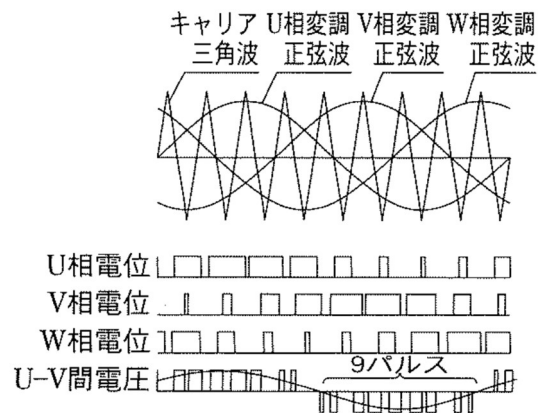


図 2.3
三相交流の作成 (2 レベル・9 パルス) の例

図 2.3 では \bar{U} - V 間電圧の例を示しており、電圧を可変にするには矩形波の幅を変化させて行い、周波数を変化させるにはスイッチング周期を変えることで行う。

インバータ周波数は最高速度で 170Hz 程度であり、インバータ制御によれば回路の接続を変えることなく、電圧と電流の位相関係を制御して回生ブレーキをかけることができる。

(2) トルク急変時の電動機トルク制御

電動機制御の方法には、 V/f 一定・すべり周波数制御と、ベクトル制御がある。

ベクトル制御は電動機電流を磁束を発生する電流成分と、 90° 位相のトルクに寄与するトルク電流成分に分けて、励磁電流を一定に保ちながらトルク指令に対応したトルク電流を制御する方式である。すべり周波数制御に比べ、トルク変化に対して応答性が良く、制御精度も向上する。図 2.4 は、トルク急変時の制御方法の比較である。

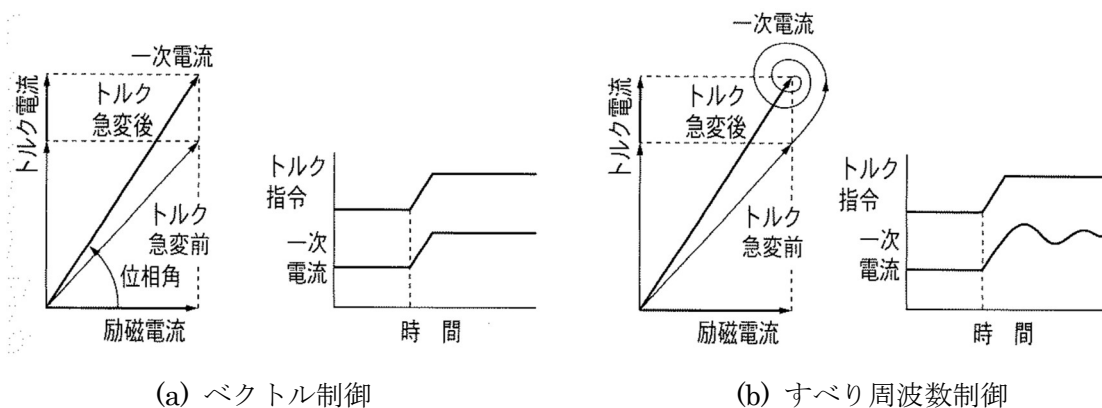


図 2.4 トルク急変時の制御比較

(3) 永久磁石同期電動機駆動電車(3)

高効率で高力率の電動機として、永久磁石同期電動機が開発されている。

同期電動機はすべりがないため、1つのVVVFインバータと1台の同期電動機が対になっており、図 2.4 は 2in1 形インバータの主回路構成例である。

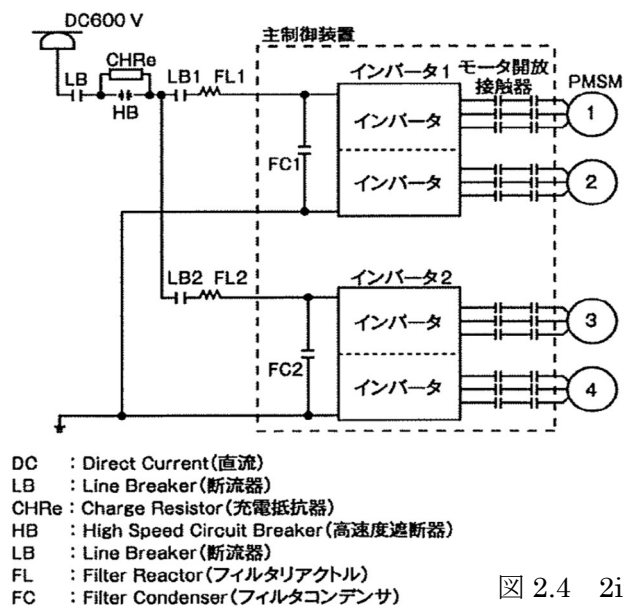


図 2.4 2in1 形インバータ (2)

(4) 主な直流電車の諸元

表 2.1 に主な直流電車の諸元例を示す⁽³⁾。

表 2.1 主な直流電車の諸元例

事業者名	帝都高速度交通営団	JR 東日本	東京地下鉄
型式	6000 系	E231	13000
M/T 比	6M4T	4M6T	7M
編成質量 (自重) (t)	280.6	255(256.6)	239.1
車体	アルミ製	ステンレス鋼	アルミ製
電源電圧	1500V	1500V	1500V
歯数比	6.53	7.07	7.79
最高速度(km/h)	100	120	110
主電動機型式	直流直巻電動機	誘導 MT73	永久磁石同期電動機
1 時間定格出力(kW)	145	760×2unit	205
力行制御方式	電機子チョップ制御	3 レベル VVVF	2 レベル VVVF (IGBT)
ブレーキ方式	回生ブレーキ併用電 気指令式空気ブレー キ	回生ブレーキ併用電 気指令式空気ブレー キ	回生ブレーキ併用 電気指令式空気ブレ ーキ
製造初年	1971	2000	2016

参考文献

- (1) 持永芳文編著「電気鉄道技術入門」 pp.53-63、オーム社、2019 年 2 月
- (2) 電気学会編「最新電気鉄道工学 (三訂版)」 pp.42-58、p.345、コロナ社、2017 年 8 月
- (3) 東芝レビュー「東京メトロ銀座線車両向け PMSM 主回路システム」 Vol.62、No.6、
2008