車両用電動機の絶縁方式

UDC
621.313.13.048:621.333
678.842:678.074
678.643/5'43-419

A few problems about insulation system of traction motors.

桑 島 千 秋*・白 土 経 雄*

KUWASIMA Tiaki

SIRATO Norio

要 旨

車両用電動機の使用条件はきわめてきびしい反面その進歩の方向は軽量小形化に向けられている。これに対し、絶縁方式の寄与するところは大きい。本文では車両用電動機の特異性と軽量小形化の内容について説明し、F種、H種絶縁に対する新しい規格の温度上昇限度の適当であることを熱劣化試験の結果により確かめ得た点、新しい絶縁方式としてシリコンゴム絶縁方式およびエポキシ樹脂、マイカガラス絶縁方式について紹介する。

1. 緒 言

車両の進歩発展は経済的にいかにサービスを向上するかに向けられている。すなわち、最小の経費でできるだけ多くの旅客または貨物を、できるだけ早く目的地に運ぶことである。このためには軽量化と、単位容量の増大が必要である。車両用電動機においても、その進歩発達はこの線に沿って、小形軽量化、出力増大、信頼度の増大に向けられ、これらはその絶縁方式に負うところが多かったといえる。さらに最近の絶縁材料の急速な進展に伴い、絶縁方式も転換の機運にあり、特に車両用電動機の場合はこれが顕著にあらわれてきていると考えられる。

以下車両用電動機の特異性を考えつつ、今後の問題点につき考えてみたい。

2. 車両用電動機に要求される条件

車両用電動機に要求される条件は地上用のものに比べ、非常にきびしく、その内容は

2-1 寸法制限

寸法制限の一つは軌間寸法から定まるものと、動輪径から定まるものとである

これはサービス向上のため、あるいは経済性から電動機容量を増大する場合の制約となる。

2-2 振動衝撃

車輪がレール継目、ポイントを通過するとき、車輪にブレーキをかけたときなどに発生する振動衝撃は、速度に比例して増大するが、最大：車軸において 20~30g
台車中央において 1g
車体 0.2~0.3g
であり、主電動機の取付方法により、それぞれ上記の振動加速度に耐えねばならず、もちろん絶縁物も同様である。

2-3 じんあい、湿気

車両用主電動機の場合車両の巻き上げる砂塵、ブラシのカーボン粉末に加え、車輪ブレーキシューの摩耗による鉄粉と、歯車箱からの油もれやディーゼル機関車の場合エンジン潤滑油など油気吸込の影響は地上用にみられない悪条件であり、これらのじんあいのコイル表面への付着に際し、必要な耐面耐力を必要とする。

また、屋外駐車のため梅雨時の水滴凝結、雨中走行時の雨滴侵入、冬期粉雪の侵入などにより、絶縁物表面の凝滴浸水に耐えねばならぬ。

2-4 脈動負荷

車両用電動機の負荷は起動停止時の高加速高減速の要求から 160~180% の過負荷使用が常態であり、その他無加圧区間の通過、開閉器のしゃ断再投入時や、他の電車のノッチ・オフによる電圧急変時などの突入電流などから急峻な脈動負荷であり、絶縁物はこれらの作動の際の熱的機械的衝撃に堪えなければならないなどの特異性を有している。これらは車両用電動機の電気的設計、絶縁物を含む構成材料の機械的強度に対する非常にきびしい要求となってきている。

この他車両のサービスの性質上、保守点検が容易であり信頼度の高いことも不可欠の要素となっている。

3. 車両用電動機の進歩¹⁾²⁾³⁾

車両用電動機についてはその進歩を表現する尺度として軽量化をもって表わすことができる。電動機の大きさは交流、直流および電圧など電気方式や、駆動方式にも

昭 36. 1. 16 受理

* 日立製作所 日立工場

関係するが、いずれにせよ単位出力当りの重量が小さい方が経済的設計であることには変りない。そこで、単位出力当り重量、すなわち比重量 (kg/kW) の過去 50 年の推移を示せば図 1 のとおりである。

図 1 からみられるように一昔前には 15~20kg/kW で

図 1 電気機関車および電車用主電動機比重量の変遷

a 釣掛式駆動方式

b 直角カルダン方式

c 可撓接手駆動方式

d 中空軸平行カルダン方式

図 2 各種駆動方式

あったものが 5~10 kg/kW に軽減されている。この軽量化は

- 3—1 分離駆動方式による回転数の上昇
- 3—2 冷却効果の改善による容量増大
- 3—3 耐熱絶縁材料の使用による温度上昇限度の上昇
- 3—4 整流の改善

などによるものである。

3—1 分離駆動方式による回転数の上昇
電動機出力は

$$(\text{出力}) \propto (\text{トルク}) \times (\text{回転数})$$

であり電動機大きさは

$$(\text{電動機大きさ}) \propto (\text{トルク})^{2/3} \propto (\text{出力/回転数})^{2/3}$$

で表わされる。すなわち、たとえば回転数を 2 倍にすれば、他の要素を無視するとして同じ大きさで 2 倍の出力が得られることになる。したがって、電動機の回転数をあげることが軽量化の有効な手段であるといえる。従来、車両電動機の駆動方式は一昔前まではほとんど図 2 (a) に示すような釣掛式電動機であり、これは構造が簡単、取扱が容易であるが、車軸からの振動衝撃が直接電動機に加わるので、電動機の構造もがんじょうにする必要があり、歯車も丈夫にする必要から歯車比も大きくとれなかったため、低速度のものが多かった。

近年になって電動機は台車装荷になり、分離駆動方式が採用されている。分離駆動方式としては図 2 に示すように直角カルダン式、可撓継手式、中空軸平行カルダン（ディスク）式やその他クイル方式などがあるが、いずれも電動機は車軸の振動衝撃から開放されるため、機械強度を低減でき、歯車比も大きくとれ、電動機の回転数を上げることが可能になった。

図 3 電機子導体の配列

釣掛式では定格回転数は 1,000rpm 以下であり、分離駆動方式では定格回転数 2,000rpm 最高回転数 4,500~6,500 rpm になってきている。

3—2 冷却効果の改善による容量増大

新しい車両用電動機では、冷却回路の合理的設計はもちろんであるが、次のような設計上の改善がなされている。

図 4 角形磁気棒に納められた界磁コイル

図 5 丸形磁気棒に納められた界磁コイル

イ) 電機子コイル

電機子コイルの溝内占積率を良くするため従来図 3 (a) のような配列であったものを、(b)(c) のような配列にすることが行なわれる。このようにしてコンダクターの占積率を高めるとともに、漂遊負荷損を減少し、熱伝導を良くし、電流密度を高め得る結果、容量増大が可能となる。逆に同一容量ではそれだけ導体を細くし得、このことは遠心力も小さくし、絶縁物に対する負担を小さくし得る。

ロ) 界磁コイル

釣掛式電動機では激しい振動に耐えるため、界磁コイルは強力なパネによって固定されていた。また、電動機を中心と車軸中心距離は最大歯車比からほぼ定まり、最大容積を得る点から、磁気棒は角形が理想的な形状であった。

しかし台車装荷の場合、電動機は強烈な振動の影響から開放され、小形化が可能となり、中心間距離に対し占有し得る容積を前程問題にする必要がないため、一般に製作しやすい圧延鋼材の丸形としている。この場合、図 5 に示すように、エッジワイズ巻きとし、界磁コイルを磁気棒に沿って曲げ、しかも、主極と補極コイルがせり合

表 1 各種規格の主電動機温度上昇限度

定 格	部 品 名	A 種								B 種							
		抵 抗 法				温 度 計 法				抵 抗 法				温 度 計 法			
		JEC -122	JPRS -1	AIEE -11	BSS -173	JEC -122	JPRS -1	AIEE -11	BSS -173	JEC -122	JPRS -1	AIEE -11	BSS -173	JEC -122	JPRS -1	AIEE -11	BSS -173
連 続	電機子 界磁	85		85	85			65	65	105	120	120	120		90	90	90
		85		85	85			65	65	105	130	130	130		95	95	95
一 時 間	電機子 界磁	100		100	100			75	75	120	120	120	120		90	90	90
		100		100	100			75	75	120	130	130	130		95	95	95
連 続	整流子					95		90	90					95	95	90	90
						100		90	90					100	95	90	90
連 続・一 時 間	軸 受					40								40	40		

基準温度 25℃

っているところは、一部切欠をつくることが採用されている。さらに、機関車用には Open face コイルが採用されている。このように界磁コイルの占積率を良くし、コイルと磁気棒との間に空隙をなくし、熱放散をよくしている。以上により界磁コイルの温度上昇は約10~50%少なくなっている。

3-3 耐熱絶縁材料の使用による温度上昇限度の上昇
最近合成化学の進歩はめざましく、電気絶縁材料も次々と新しいものが誕生した。

特にガラス繊維の発達は、従来のB種絶縁の際、補助材料として使用された紙、布を駆逐した絶縁法が、車両電動機には全面的に使用されている。一方、絶縁ワニスについても、従来アスファルト系の熱可塑性よりフェノール系熱硬化性ワニスを使用するようになり、さらに耐熱性を要求されるものに対してはシリコンワニスを使用する絶縁方式が採用されている。

以上の結果、F種・H種と耐熱性および電氣的諸特性が改善され、電動機の小形軽量化が実現された。

3-4 整流の改善

電動機が高速化し、温度上昇限度の上昇とともに整流は困難になってくる。これらは整流子構造の改良、製作技術の改善、2~3分割刷子の採用などにより解決されている。

4. 車両用電動機の温度上昇限度

車両用電動機の温度上昇限度について、従来制定公布された規格値を示せば表1に示すとおりである。まだF種H種を包含する規格は現在審議中の IEC-9 (案) 表2を除いて制定されていない。

B種については JEC-122 は1時間定格電流に対する温度上昇限度は120℃であるに対し、連続定格電流に対する温度上昇限度は105℃で、連続定格の場合1時間定格より15℃低くとなっている。JPRS-1は絶縁物の進歩

表 2 車両主電動機の温度上昇限度
I. E. C No 9 (案)

絶縁 級別	定 格	部 品 名	測 定 法	温度上 昇限度 (℃)
A 種	連 続	電機子コイル, 界磁コイル 整流子, 集電環	抵 抗 法	85
			電気温度計法	100
E 種	1 時 間	電機子コイル, 界磁コイル 整流子, 集電環	抵 抗 法	100
			電気温度計法	105
B 種	連 続 および 1 時 間	電機子コイル 界磁コイル 整流子, 集電環	抵 抗 法	105
			抵 抗 法	115
F 種	連 続	電機子コイル 界磁コイル 整流子, 集電環	抵 抗 法	120
			抵 抗 法	130
H 種	連 続	電機子コイル 界磁コイル 整流子, 集電環	電気温度計法	105
			抵 抗 法	120
F 種	連 続	電機子コイル 界磁コイル 整流子, 集電環	抵 抗 法	130
			抵 抗 法	140
H 種	連 続	電機子コイル 界磁コイル 整流子, 集電環	電気温度計法	105
			抵 抗 法	140
F 種	連 続	電機子コイル 界磁コイル 整流子, 集電環	抵 抗 法	155
			抵 抗 法	160
H 種	連 続	電機子コイル 界磁コイル 整流子, 集電環	電気温度計法	105
			抵 抗 法	160

表 3 絶縁物の耐熱区分
I. E. C Pub. 85-'57 Recomm-
endation

級 別	許容最高温度℃
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	188
C	180超過

をとり入れて、連続定格に対する温度上昇限度を1時間定格の場合と同様、電機子コイル120℃, 界磁コイル130℃にとっている。BSS-173, AIEE-11の規定も同様である。

IEC Pub 85-'57によれば、絶縁物の

認められた級別, およびそれらに許容された温度は表3のとおりである。

普通電気機械の標準としては, 一般に最高温度でなく温度上昇値を規定するが, 実際に測定するのは絶縁部の最高点温度でなく, 平均値であるため, この差を考慮して上記 Recommendation に記載された温度と, 周囲温度との差よりも小さな温度上昇値を規定している。

車両電動機では 25°C 基準温度はと普通電気機械よりも低いが, 表2と表3とを比較すると明らかなように, 絶縁物の許容最高温度を温度上昇値にとっている。

これは車両用電動機は実際運転時間が, 電車 20h. 電気機関車 15h. 力行率 50% 以下であること, 試験時と使用状態の差を考慮したものであるが, 寿命を多少犠牲にしてもコイル温度上昇限度を高くし, 軽量化をはかりたいという使用者の要求のあらわれである。

5. 車両電動機コイルの熱劣化試験⁴⁾

前述したように, 車両電動機は一般電動機に比較して使用条件が非常にきびしい反面, 許容温度を温度上昇限度とするように高くとっている。

現在普及している F.H 種絶縁につき, この点が適当であるかどうかを, モデルコイルによる熱劣化試験により確認を行なった。

5-1 実験試料

試験に供したモデルコイルは図6に示す寸法のもので, その絶縁構成を表4に示した。

図6 モデルコイル

5-2 劣化試験

試料は表5に示す温度で加熱劣化させた。なお, 加熱中の試料は1日おきに乾燥器からとりだし, モデルコイルの両端を金具で締め付けて, 表6に示すような機械的振動を加えた。振動試験中の試料には, 振動による機械的ストレスと冷却による熱衝撃が同時に加わることになる。

加熱試験前および加熱開始後, 6, 16, 40, 90 日目に試料をとり出し, 常態および相対湿度 100% 40°C において 72 時間吸湿させた後の絶縁破壊電圧を測定した結果を図7, 図8に示した。

この結果から明らかなように, 絶縁破壊電圧は加熱回数の経過につれて低下するが, これに基づいてコイルの

表4 絶縁仕様

絶縁法	絶縁種別	B 種	F 種	H 種
素線絶縁		0.1 マイカ ペーパー (B種ワニス)	0.1 ガラス マイカ (F種ワニス)	0.1 ガラス マイカ (H種ワニス)
外装絶縁		0.13 マイカ ペーパー (B種ワニス)	0.13 ガラス マイカ (F種ワニス)	0.13 ガラス マイカ (H種ワニス)

表5 加熱温度

絶縁級別	B 種	F 種	H 種
試験温度 °C	180	220	250

表6 振動条件

振幅	2mm
振動数	2500 cpm
加速度	7g
時間	1h

図7 加熱による破壊電圧の変化(常態)

図8 加熱による破壊電圧の変化
(40°C 100% RH. 72h 吸湿後)

耐熱寿命を判定することが可能である。このほか吸湿時の誘電特性, 絶縁抵抗などについても測定したが, これらは, いずれも劣化時間に対して一義的に変化しないこ

とが明らかになった。

5-3 加熱減量試験

一般に寿命 t と絶対温度 T の間には許容温度範囲内で

$$\log t = -\frac{\alpha}{T} + \beta \quad (\alpha, \beta \text{ は定数})$$

なる関係があるので α が定まれば、ある温度の試験結果から、ほかの温度における寿命を求めることができる。モデルコイルの処理に用いた B, F, H 種の含浸ワニスの加熱減量を測定し、この結果から α を算定して表 7 を得た。すなわちコイルの寿命の減少割合は、ワニス皮膜の温度上昇に伴う重量減少率によって判定されるものとした。

表 7 α の 値

ワニスの種別	α
B 種	5.93×10^3
F 種	6.39×10^3
H 種	6.91×10^3

5-4 寿命の推定

モデルコイルの劣化試験とワニスの加熱減量試験から各試料の RH 100%, 40°C, 72 時間吸湿後の絶縁破壊電圧が、初期値の 60% に低下したときを寿命とみなしてそれぞれの時間を求め、一方、ワニス皮膜の加熱減量試験から求めた各寿命曲線のこう配 α を使用して図 9 に示す温度—寿命曲線が得られた。

図 9 を使用すれば各絶縁種別について、各仮定使用状態におけるコイル寿命を推定できることになる。車両電

図 9 温度—寿命曲線

表 8 推 定 寿 命

絶縁種別	温度 T_0 での連続寿命 (h)	図 10 の負荷サイクルその寿命 (h)
B 種	4.80×10^4	6.72×10^4
F 種	9.10×10^4	6.55×10^4
H 種	2.31×10^5	1.75×10^5

図 10 負荷サイクル

動機では、負荷の変動が大きく、運転中温度上昇の変化がはげしいから、寿命を推定するにあたり、温度の変化状態を十分考慮に入れなければならない。最近このような場合の算定法について新しい考え方が提案されている。

ここでは一例として、24 時間中の負荷サイクルが、図 10 に示すような簡単な場合を仮定して、図 9 を適用し、推定寿命と計算した結果を表 8 に示した。比較のために、一定温度 T_0 で連続運転した場合の寿命も示してある。

以上の結果によれば図 10 に仮定した負荷サイクルに

における推定寿命はB種 7~8 年, F種 7~8 年, H種 20 年程度となりF種, H種絶縁が従来のA種, B種絶縁に比較して, より高度の信頼性を有していることが確認された。

6. 最近の車両電動機絶縁方式について⁵⁾⁶⁾⁷⁾

前述したように, 絶縁材料の進歩は車両電動機の発展に寄与するところが非常に大きいのであって, 上述のきびしい使用条件を克服して, 小形軽量化, 保守の簡易化がはかられて行くものと考えられる, この線に沿った最近の 2~3 の新しい絶縁方式としてつぎのものがある。

6-1 マイカレス絶縁方式

電気絶縁物としてのシリコンゴムの歴史は古く, 1946 年 Dow Corning 社のガラス布裏張のRテープの発表に始まるが, その実用については遅々たるものがあり, 米国 Santa Fe の鉄道会社の例では, 1950 年シリコンガラスマイカテープと併用して界磁コイルに使用し, 従来のB種絶縁で平均 9 カ月約 100,000 マイル走行で絶縁劣化手直ししていたものが, 耐用年数が非常に長く延長されたと報告されている。シリコンゴムは天然ゴムと比較して常温における機械的強度は約 1/6 といわれている。したがって, ガラス布を裏張して機械的に強化を計ったものがRテープであり, Santa Fe 鉄道における絶縁方式はガラスマイカテープに絶縁耐力を期待し, シリコンゴムに熱伝導の改良と, 衝撃振動に対する緩衝性の増大を受け持たせたものと考えられる。

ロンドン地下鉄においては, 1953~1955 年の間にシリコンゴムの使用に対し種々検討して電動機 4 台を試作した報告がある。本絶縁方式は電機子に対し素線絶縁はシリコンガラスマイカテープにより, 対地絶縁としてセミキュアのシリコンゴムを巻き, さらにガラステープで保護したもので, 界磁にも同じ方式が使用されている。4 台の内 1 台の電動機は, 1956 年にシリコンゴムアフターキュアが十分でなく事故をだしたため, その後は完全キュアのシリコンゴムテープが使用されている。さらに, 1957 年にガラスマイカをやめたことが報ぜられている。

また最近 Dow Corning 社から三角テープが発表された, これは従来の矩形断面のテープで半重ね巻きしたときできる隙間をなくすよう考えたものでマイカ無し方式に対するものである。

シリコンゴムは振動その他運転上の機械的衝撃を緩和してくれる利点を有し車両用としては好ましい絶縁物であるが下記のような欠点がある。

(i) キュアリングスケジュールがむづかしい。

表 9 各種絶縁方式 Coil の温度上昇

絶 縁 種 別	最終温度(°C)
オープンフェースコイル	137
従来の絶縁方式	275
ポリエステル樹脂 No. 1	268
〃 No. 2	248
シリコンゴム	224
エポキシ樹脂 No. 1	207
〃 No. 2	160
〃 No. 3	141

(ii) マイカ絶縁方式に比べて絶縁層が厚くなる

しかし, シリコンゴムのみの絶縁方式が実用化されてきたことは, 従来のマイカに依存する絶縁方式からマイカ無し方式に進みつつある最近の傾向を示すものといえることができ, シリコンゴムテープの特性の改善が強く望まれる。

6-2 無溶剤ワニス使用マイカ絶縁方式

従来, マイカ絶縁方式は溶剤系ワニスで含浸または, 真空注入がなされてきた。溶剤系ワニスはその成分の約 50% が溶剤であり, 乾燥の際, 溶剤が蒸発するので絶縁層に気泡空隙を残す結果となる。この気泡空隙は熱伝導を邪魔して, しかも外部からの湿気, じんあいが入り込む通路になりやすい。したがって, マイカの絶縁耐力と, その空隙をうずめて気泡空隙のない一体絶縁層を形成する無溶剤ワニスの真空注入は最適の絶縁方式といえる。

米国 Pennsylvania 鉄道会社では Integrated Insulation(一体絶縁法)と呼ばれる絶縁方式を 4 年がかりで開発したことが報告されている。これは, 無溶剤ワニスとしてエポキシ樹脂使用の絶縁方式であって, 電機子および界磁コイルの絶縁事故の 75% が除去され, 検修回帰期間を 2~3 倍に延ばすことができたとのことである。

各種無溶剤ワニスを真空注入したコイルの温度上昇については, 表 9 に示すとおりで, エポキシ樹脂 No. 3 の温度上昇がオープン・フェースコイルに比敵することは注目される。同社では本方式による 900 台の電動機, 68 台のディーゼル主発電機がすでに使用されている。従来の絶縁方式の電動機は使用開始後 3 年で点検が必要であったが Integrated Insulation がなされたとき定期点検補修は事実上不要といわれている。

以上のとおりマイカとポリエステル・エポキシ樹脂などの, 無溶剤でそれ自体重合して気泡空隙のない絶縁層を形成する耐熱安定性の高い樹脂が出現し, 絶縁方式は大きく変革する気運にある。しかしながら,

(1) コイル打ち込み時のヒビ割れの発生

(2) ポットライフが非常に短いなどの欠点については今後の改良にまつところが大きい。

7. 結 論

以上車両用電動機の特長性を顧み、小形軽量化の経過と内容と、絶縁方式の果たした役割について述べ、車両用電動機において採用せんとしているF種、H種の規格が、従来のB種の場合と同等以上の信頼度を有することの確認結果について述べた。

また、今後の車両用電動機の新しい絶縁方式として、注目されるシリコンゴムおよびエポキシの一体絶縁を

紹介した。これらの普及発達には絶縁材料製作者、電動機製作者、それと使用者の密接な協力が必要であり、今後の研究発展を期待するとともに、拙文がなんらか寄与すれば筆者たちの望外の幸いとする次第である。

文 献

- 1) 平田： 日立評論 40, 1329 (昭 33-11)
- 2) 北野, 平楽： " 別冊 20, 63 (昭 32-11)
- 3) 平田, 村田他： " 40, 511 (昭 33-4)
- 4) 曾根： " 42, 1320 (昭 35-12)
- 5) Railway Locomotive & cars 65 (December 1953)
- 6) Railway Locomotive & cars 86 (September 1959)
- 7) Silicone Review 9, 4 (昭 34-11)

色 材 協 会 誌 7 月 号 (予 告)

報 文

メラミン樹脂塗装とフクレとの関係……………成 川 誠 一 郎
(大阪府立工業奨励館)

ハガレ試験の意義……………小島陽之助, 井上幸彦, 加藤英典, 桐生春雄
(東京工業大学)

電気塗装における塗料粒子の比電荷について……………萩 原 正 夫
(大阪大学)

塗料皮膜の劣化に関する研究 (第1報) ……………桐 生 春 雄, 佐 藤 弘 三
(日本自動車(株))

資 料

特殊印刷における最近の発展……………飯 坂 義 治
(共同印刷(株))

船舶用電動機の絶縁ワニス……………上 村 哲
(東洋電機(株))

塗装用高分子皮膜の耐候性……………松 田 種 光
(鉄道技術研究所)

文 献 特 許 抄 録 業界ニュース