

# エナメル線の熱衝撃に関する二、三の考察

## Some Investigations on Heat Shock of Enamelled Wires

外山 泰久\* 野口 宏\*  
Yasuhisa Toyama Hiroshi Noguchi

### 内 容 梗 概

エナメル線をコイルに巻いたり伸長した状態で加熱するときエナメル皮膜にき裂を発生する現象、すなわち熱衝撃について、酸化劣化との関係、加熱速度、熱履歴およびトランス油の影響を検討してつぎの結論を得るとともに、材料の組成と熱衝撃の関係について考察を述べた。

1. 通常の熱衝撃試験におけるき裂発生には酸化劣化の影響はない。
2. エナメル線の熱衝撃によるき裂発生は急熱、徐熱、熱履歴の影響はなく、エナメル皮膜のストレスの大きさと温度に関係する現象である。
3. 熱衝撃によるき裂の発生はポリエステルのように低分子量の材料を焼付けた三次元ポリマのエナメル線に特有のもので、これらの材料に線状ポリマを配合することによって改善される見込がある。
4. ポリエステルエナメル線およびホルマール線のトランス油中の熱衝撃性は空気中の場合に比べ若干良くなる傾向がある。

### 1. 緒 言

エナメル線をマンドレルに巻くか、伸長した状態で加熱するとエナメル皮膜にき裂を発生することがある。この現象を熱衝撃 (Heat Shock) と呼んでいる。

最近、コイル巻作業の機械化が広く行なわれ、エナメル線は屈曲および、伸長された状態でコイルに巻かれ使用されることが多い。さらにコイルは乾燥、ワニス処理工程中および使用時における温度上昇などの熱を受ける。これが実際上考えられる熱衝撃の条件となる。

一方、熱衝撃によるき裂の発生は従来広く使用されていたホルマール線においては見られなかったが、ポリエステルエナメル線などの新しいエナメル線が使用されるようになって問題となってきた。ポリエステルエナメル線は耐熱性その他の諸特性においてすぐれており、ホルマール線に代って広く用いられているが、熱衝撃に弱いことが実用上問題とされる唯一の欠点と考えられる。エナメル線の熱衝撃についてはすでに実験結果が詳しく報告されているが<sup>(1)</sup>、その後詳細に検討し二、三の新しい知見を得たので結果をとりまとめ報告する。

### 2. 熱衝撃と熱劣化

エナメル線の熱衝撃によるき裂発生について、熱(酸化)劣化によるものではないかという質問を受けることがある。もちろん、通常熱劣化の影響があらわれる時間に比べて、熱衝撃によるき裂の発生は短時間であるが、熱衝撃という現象と材料の本質の酸化分解などによる熱劣化との区別は明らかにする必要があると考える。

#### 2.1 試料と試験法

供試エナメル線は、油性エナメル線、ホルマール線(あめ色)、ポリウレタンエナメル線、アクリルエナメル線およびポリエステルエナメル線の5種類で、皮膜厚はいずれも1種のものである。第1表に供試線の寸法を示す。

これらのエナメル線を第1図aに示すテーパマンドレルに巻き第1図bのようなコイルを5個ずつ作り、100, 125, 150, 175, および200°Cの恒温槽に入れ、空気中および窒素ガス中で一定時間加熱後取り出して肉眼でエナメル皮膜のき裂発生を調べ、5個のコイルについてそれぞれのき裂発生最大巻付倍径の平均をもってあらわした。

#### 2.2 試験結果と考察

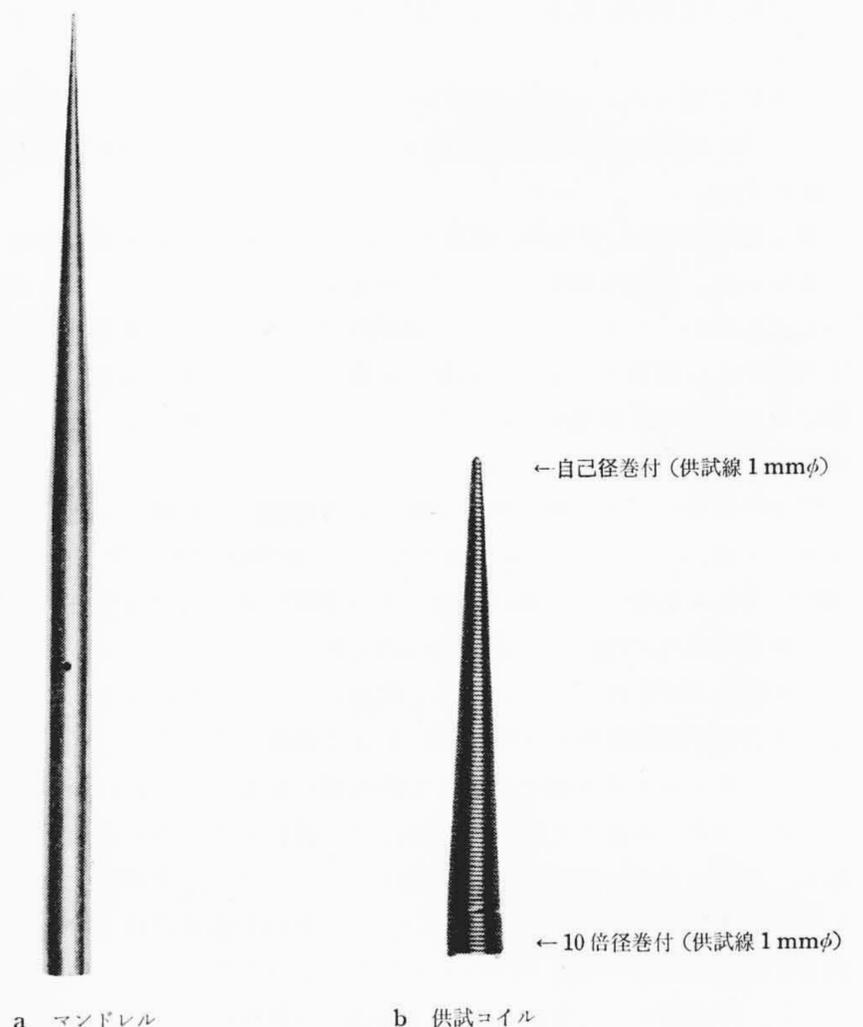
第2図に100~200°Cで空気中および窒素ガス中で1時間加熱した場合の各種エナメル線の熱衝撃性をき裂発生巻付倍径で示した。なお、巻付倍径に相当する皮膜の伸長率を次式で計算し図の右側に示した。

$$\text{伸長率} = \frac{D_1}{D_1 + D_2} \times 100\%$$

$D_1$ : 供試線径

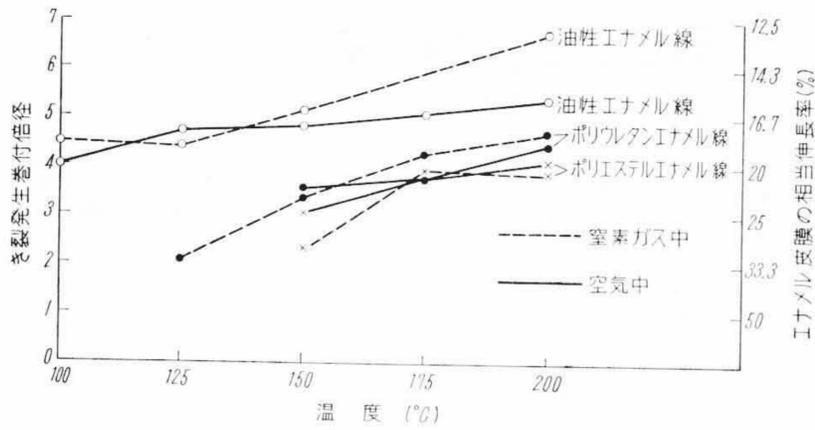
$D_2$ : マンドレル径

第2図の結果から、加熱時間1時間の場合には100°Cから200°Cまで空気中、窒素ガス中とも熱衝撃によるエナメル皮膜のき裂発生は大差ない。この図でホルマール線およびアクリルエナメル線の結

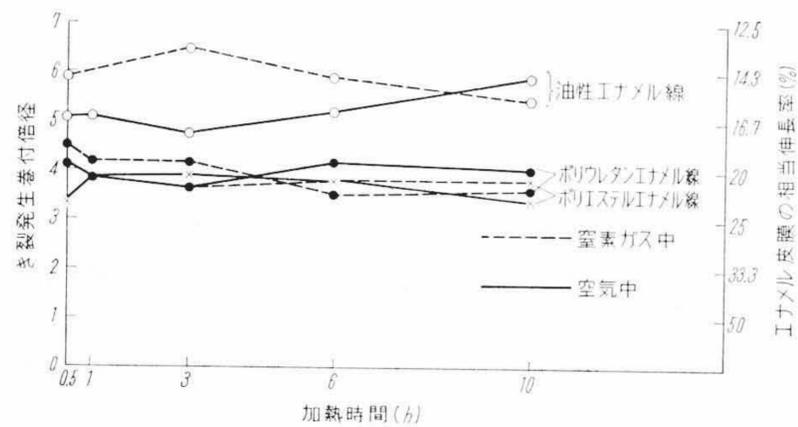


第1図 テーパマンドレルと供試コイル

\* 日立電線株式会社電線工場



第 2 図 各種エナメル線の熱衝撃—加熱温度の影響 (加熱時間 1 時間)



第 3 図 各種エナメル線の熱衝撃—加熱時間の影響 (加熱温度 175°C)

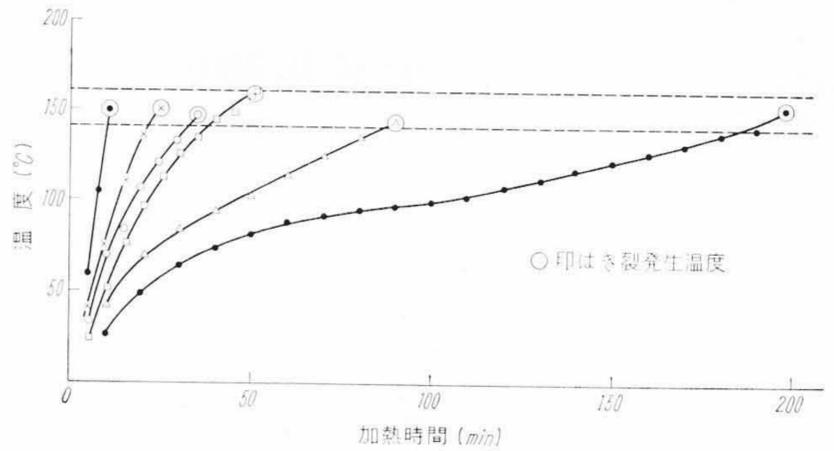
果が示されていないのは、これらが 1 時間加熱の場合には 100 ないし 200°C の熱衝撃試験において自己径巻付でもき裂発生しないことを示す。また同様にポリエステルエナメル線とポリウレタンエナメル線 (空気中) は 100°C と 125°C, ポリウレタンエナメル線の窒素ガス中の試験では 100°C において自己径巻付でもき裂を発生しないことを示す。

つぎに各種エナメル線を 175°C で 30 分, 1 時間, 3 時間, 6 時間および 10 時間空気中および窒素ガス中で加熱した場合の結果を第 3 図に示す。

第 3 図のとおり, 空気中, 窒素ガス中ともに 30 分で熱衝撃の影響があらわれ, 加熱時間を延長しても熱衝撃の影響はほとんど変わらないことがわかる。さらに第 3 図は加熱時間が 30 分から 10 時間までは空気中も, 窒素ガス中も熱衝撃の影響はほとんど差がなく, 熱衝撃による皮膜のき裂発生には酸化劣化はほとんど影響しないことが明らかとなった。

以上の結果から, 各種エナメル線の耐熱衝撃性を比較すると, ホルマール線, アクリルエナメル線はもっとも耐熱衝撃性がすぐれ, 熱 (酸化) 劣化の影響のない範囲においては 200°C まで自己径巻付 (皮膜の伸長率 50% 相当) でもき裂発生の心配はない。ポリエステルエナメル線は 150°C 以下ではほとんど問題ないが, 150°C 以上においては 4 倍径 (皮膜伸長率 20% 相当) が安全巻付倍径と考えられる。ポリウレタンエナメル線は 125°C で熱衝撃の影響があらわれ, ポリエステルエナメル線より耐熱衝撃性はやや低いと考えるのが適当である。油性エナメル線の耐熱衝撃性はもっとも低く, 100°C においてすでに 4 倍径でき裂が発生しているため実用上は 6 倍以上の巻付倍径 (皮膜伸長率 14.3% 相当) をとるのが安全であろう。

なお, 熱衝撃によるき裂発生は導体径, 皮膜厚によって若干変ることが示されているが, 重大な影響はないと考えられる<sup>(1)</sup>。



第 4 図 ポリエステルエナメル線の熱衝撃に及ぼす加熱速度の影響

第 1 表 供試線の寸法

線種	導体径 (mm)	皮膜厚 (mm)
油性エナメル線	0.1	0.039
ホルマール線	0.1	0.038
ポリウレタンエナメル線	0.1	0.032
アクリルエナメル線	0.1	0.031
ポリエステルエナメル線	0.1	0.039

第 2 表 ポリエステルエナメル線およびホルマール線の熱衝撃に及ぼす熱履歴の影響

(熱衝撃試験: 175°C-1 時間加熱)

加熱サイクル (125°C-8h/day)	き裂発生巻付倍径	
	ホルマール線	ポリエステルエナメル線
0	自己径巻付でき裂なし	3.2~4.6
1	自己径巻付でき裂なし	3.8~4.8
10	自己径巻付でき裂なし	3.5~4.3
20	自己径巻付でき裂なし	3.5~5.1
40	自己径巻付でき裂なし	3.4~4.5

### 3. 加熱速度と熱履歴の影響

#### 3.1 加熱速度の影響

第 1 表のポリエステルエナメル線を 3 倍径のマンドレルに 10 回巻いてコイルをつくり, 窒素ガス中で常温から毎分 0.7 ないし 11°C の昇温速度で加熱した場合, すなわち通常の熱衝撃試験におけるような急熱でなくて徐熱したときの昇温速度とき裂発生温度の関係を示すと第 4 図のとおりである。

この図からわかるようにポリエステルエナメル線の 3 倍径巻付の場合, 熱衝撃によるき裂発生温度は 150°C 前後にあることが示される。このことは第 2 図においてポリエステルエナメル線の 150°C 付近におけるき裂発生巻付倍径が 2.5~3 倍であることと一致している。したがって熱衝撃によるエナメル線皮膜のき裂発生は昇温速度, すなわち急熱, 徐熱にはほとんど影響されないと考えられる。

#### 3.2 熱履歴の影響

熱衝撃によるき裂の発生がエナメル線の巻付や伸長によるエナメル皮膜のストレスと, 加熱ことに急熱によるものとすれば, エナメル線を巻付けるか伸長した後, き裂を発生する温度以下で加熱することによって皮膜のストレスを緩和し熱衝撃を軽減できるとも考えられる。

さらにエナメル線のコイルの使用における温度上昇によってエナメル線の皮膜材料に物理的, 化学的变化が起り, そのため皮膜にかかるストレスの大きさが変り過負荷などの場合の熱衝撃の影響が変ることも考慮しなければならない。

そこでエナメル線の熱衝撃に及ぼすこのような熱履歴の影響を検討するために第 1 表のポリエステルエナメル線とホルマール線をテ

ーパコイルとし、1日8時間、125°Cで加熱するサイクルを繰返した後、175°Cで1時間熱衝撃試験を行なった結果を第2表に示す。

第2表は、ポリエステルエナメル線の場合、巻付や伸長による皮膜のストレスは加熱(前処理)によって緩和されないことを示している。また、ポリエステルエナメル線、ホルマール線ともに熱衝撃によるき裂発生は、温度上昇が125°C程度ならば加熱の履歴にはあまり影響されないようである。

以上の検討結果からエナメル線の熱衝撃についてつぎのことが明らかになった。

通常の熱衝撃試験においては酸化劣化の影響はない。また、エナメル線の熱衝撃によるき裂の発生は加熱後ほとんど30分以内に起り、熱劣化の影響のない範囲においては加熱時間を延長しても熱衝撃は変わらない。

さらに、熱衝撃によるき裂の発生は従来急熱によるものと考えられていたが、徐熱によっても起り、前処理、加熱の履歴に関係なく、一定温度において起るものである。すなわち、時間の影響はなく、一定の巻付倍径あるいは伸長度においては温度だけに関する現象である。

#### 4. 材料と熱衝撃の関係

各種エナメル線についての熱衝撃試験から、熱衝撃に強いエナメル線と、熱衝撃を受けやすいものが区別される。すなわち、熱衝撃に強いものはホルマール線、アクリルエナメル線、熱衝撃に弱いものは油性エナメル線、ポリウレタンエナメル線、およびポリエステルエナメル線である。

エナメル線用のワニスには各社独特の場合が多く、同じ種類についても多少組成の異なることがあるが、基本樹脂を中心に材料の組成と熱衝撃との関係を一応まとめてみるとつぎのようになる。第3表に各種エナメル線の一般的な材料組成の概要を示す<sup>(2)</sup>。

エナメル線材料の組成と今までの試験結果から、ホルマール線、アクリルエナメル線のように高分子量の線状ポリマを主体としたものは熱衝撃に強いのに対し、ポリエステル、ポリウレタンおよび油性エナメル線のように比較的分子量の材料を焼付けて三次元構造のポリマで構成されているものは熱衝撃に弱いことが明らかとなった。

そこで、この二つのタイプの材料を混合した場合の熱衝撃の変化を検討するため、焼付温度、耐熱性が同程度のポリウレタンとホルマールを種々の割合で混合して試作したエナメル線(1種、1mmφ)を125、150、175および200°Cで1時間加熱して熱衝撃試験を行なった結果、き裂を発生しない巻付倍径と材料の組成の関係は第5図のようになった。なお組成はポリウレタンおよびホルマールの樹脂分の重量%で示す。

第5図は、ポリウレタンが25%まで(ホルマール75%以上)では200°Cまで自己径でもき裂の発生はなく、ホルマール線と同等の耐熱衝撃性であるが、ポリウレタンが25%をこえ100%ポリウレタンまではポリウレタンの増加にほぼ比例して耐熱衝撃性が低下することを示している。これらの結果から、熱衝撃性はポリウレタン、ポリエステルのように比較的分子量の材料を焼付けた三次元ポリマ

第3表 エナメル線材料の組成

線種	基本樹脂	変性樹脂
油性エナメル線	天然樹脂	桐油
ホルマール線	ポリビニルホルマール	フェノール樹脂
ポリウレタンエナメル線	ポリエステル ポリイソシアネート	—
アクリルエナメル線	アクリロニトリル・アクリル酸エステル共重合体	—
ポリエステルエナメル線	テレフタレートポリエステル(3次元)	—

の皮膜に独特のもので、ポリビニルホルマールのような線状ポリマを混合するか、多官能分子の間に長い鎖状構造を導入することによって、その他の特性の変化は別として、熱衝撃性に関しては改善されるものと考えられる。

#### 5. トランス油中の熱衝撃性

各種エナメル線の空気中の熱衝撃試験については多くの実験結果が報告されているが、トランス油中の試験結果は発表されていない。

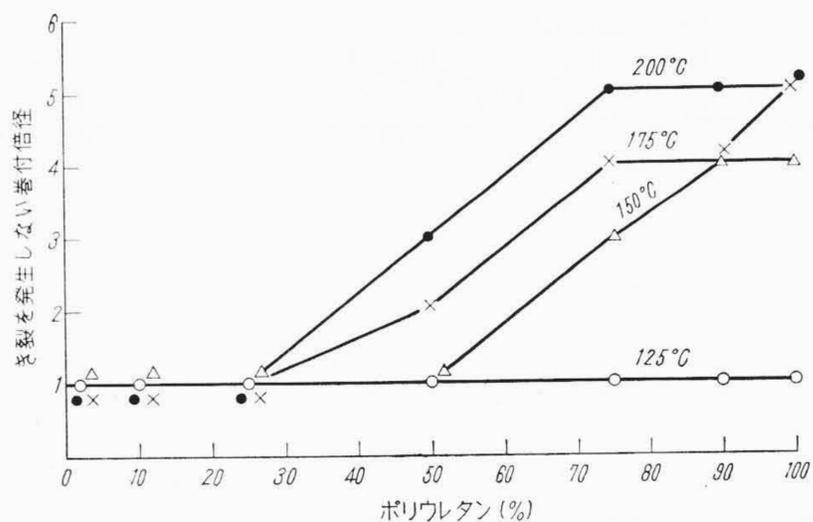
通常の油入トランスの使用条件では空気中の試験に比べて熱衝撃は緩和されるものと考えられるが、ポリエステルエナメル線などが今後油入トランスに多く用いられる傾向にあるので、トランス油中の熱衝撃試験の結果を明らかにしておくことは実用上重要である。さらにエナメル線を巻きつけたり、伸長したときの皮膜のストレスがトランス油と接触した場合にどう変るかということは熱衝撃の機構を解明するために有意義と考える。

そこで、先述の熱履歴の影響を検討した場合と同様に、ポリエステルエナメル線とホルマール線をテープコイルとし、トランス油中で1日8時間、125°Cで加熱するサイクルをくり返した後175°Cのトランス油中で1時間熱衝撃試験を行なった結果を第4表に示す。トランス油中において、125°Cで320時間加熱後ホルマール線は175°C-1時間の熱衝撃試験において自己径でもき裂発生はなく問題はない。またポリエステルエナメル線についても、トランス油中の加熱によってき裂発生巻付倍径はわずかではあるが小さくなっており、空気中に比べてトランス油中ではポリエステルエナメル線の耐熱衝撃性は若干良くなるものと考えられる。

このほか、実用上の問題としてコイルのワニス処理がある。ワニス処理によって、熱衝撃によるき裂発生巻付倍径は多少変ることもあるが、熱衝撃そのものに大きな影響を与えることはないと考える。

#### 6. 結 言

エナメル線の熱衝撃について、酸化劣化との関係、加熱速度、熱履歴およびトランス油の影響を検討し、熱衝撃について新しい知見



第5図 ポリウレタン・ホルマール混合系の熱衝撃性

第4表 ポリエステルエナメル線およびホルマール線のトランス油中の熱衝撃性

(熱衝撃試験: 175°C-1時間加熱)

加熱サイクル (125°C-8h/day)	き裂発生巻付倍径	
	ホルマール線	ポリエステルエナメル線
0	自己径巻付でき裂なし	3.6~4.9
1	自己径巻付でき裂なし	3.3~4.2
10	自己径巻付でき裂なし	3.6~4.4
20	自己径巻付でき裂なし	3.2~4.8
40	自己径巻付でき裂なし	2.9~4.3

を得るとともに、材料の組成と熱衝撃の関係についての考察を述べた。

すなわち、

1. 通常の熱衝撃試験においては酸化劣化の影響はない。
2. エナメル線の熱衝撃によるき裂発生は加熱後ほとんど 30 分以内に起り、熱劣化の影響のない範囲においては加熱時間を延長しても変わらない。
3. エナメル線の熱衝撃によるき裂発生は急熱、徐熱、加熱の履歴に関係なく、エナメル皮膜のストレスの大きさと温度だけに関係する現象である。
4. ポリエステルエナメル線およびホルマール線のトランス油中の熱衝撃性は空気中の場合とほとんど変わらない。

5. 熱衝撃によるき裂の発生はポリエステルのように低分子量の材料を焼付けた三次元ポリマのエナメル線に特有のもので、これらの材料に線状のポリマを配合することによって改善される見込がある。

終りにあたり、終始ご指導いただいた日立電線株式会社電線工場久本、間瀬両部長、吉川、松山両課長ならびにご協力いただいた肥高洋氏に深謝します。

参 考 文 献

- (1) 古賀：日立評論，42，494 (1960)
- (2) たとえば，H. L. Saums：W. W. Pendleton，Electrical Manufacturing，Oct. p. 129 (1957)



特 許 の 紹 介



特許第 274245 号

前 川 愛 一・三 浦 昭 鎭

交 流 電 気 車 両 用 単 巻 変 圧 器 巻 線 法

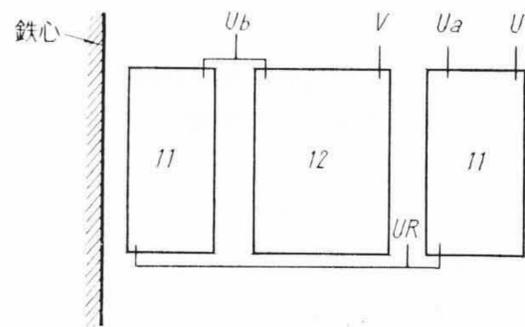
第 1 図 は直接式交流電気車両の主回路つなぎであり、 $T_1$  は単巻変圧器、 $T_2$  は主変圧器、 $M_a$  は交流整流子電動機を示す。

変圧器のインピーダンスの大小は、電気車両の性能または主回路の事故電流に大きな影響を及ぼし、力行加速時の空転防止と再粘着には、低電圧タップにおいてインピーダンスが小なることを必要とし、また定速時の事故電流値低減には、定格電圧タップ付近のインピーダンスの大なることが望ましい。そしてこのようなインピーダンスの変化は、単巻変圧器のリアクタンスの変化にそのような特性をもたせることにより実現できる。

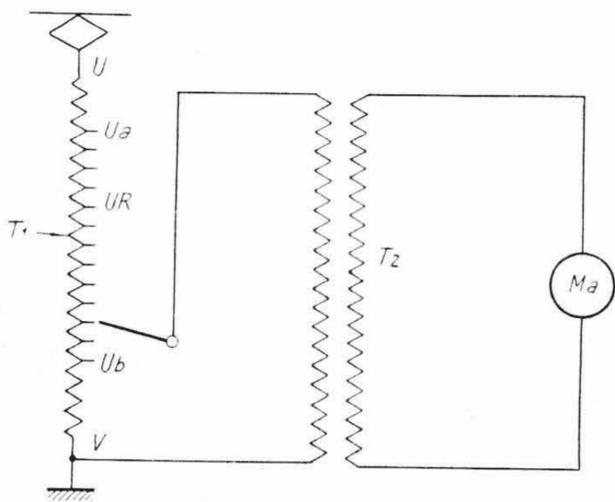
しかるに従来一般に単巻変圧器  $T_1$  では並列部分のコイル 12 を鉄心の近くに、直列部分のコイル 11 をその外部に配置しているため、各タップ位置におけるリアクタンスの変化は第 3 図に示す A 曲線のように不適当である。

この発明は第 2 図に示すように直列部分のコイル 11 を 2 つの群に分け、両群の中間に並列部分のコイル 12 をはさんだ配置としたことを特長とするもので、このような巻線法によればリアクタンスの

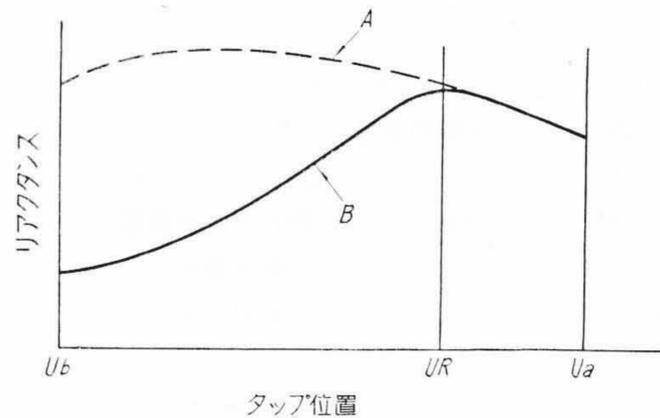
変化は第 3 図 B 曲線で示すように、最低電圧タップ  $U_b$  の位置で最小となるから、車両の力行加速時の空転防止と再粘着に有効であり、また定格電圧タップ  $U_R$  の位置ではリアクタンスは最大となるから定速時の事故電流の抑制に効果的である。したがってこの発明の巻線法を実施した単巻変圧器は、交流電気車両の運転特性改善に最適である。  
(滑 川)



第 2 図



第 1 図



第 3 図