U.D.C. 621.337.1

最近の直流電気機関車の制御について

Controlling Systems of Recent D.C. Electric Locomotives

山崎佐喜之* 桑原清輝*
Sakishi Yamasaki Kiyoteru Kuwabara

内 容 梗 概

交流電気機関車が粘着性能良好なのに刺激されて，直流機関車についても性能向上が考究され，その結果がこのほど完成した国鉄向 ED 61 形電気機関車に取り入れられた。

すなわち主電動機の界磁をあらかじめ起動時の軸重移動重量を考慮して調整しておくことにより，各軸の粘着重量に比例した引張力が得られるようにしたことが一つ。

次に各起動ノッチ間をさらにバーニア式に細分して抵抗加減を行うことにより，起動時の尖頭電流による牽引力変化を少なくして，平滑起動と同時に起動牽引力を増大し得たこと。

また空転を電気的に検出した際，自動的に砂まきを行うと同時に，空転を起した動輪の主電動機のみの電機子に分路抵抗を入れて，一時的に牽引力を減少させ再粘着の機会を与えるようにしたことなどによって，格段に粘着性能の向上に成功した。さらに回生ブレーキを併用した ED 61 形の性能は，わが国の直流電化に新紀元を画したものと思う。

本稿にこれら新装置の制御について詳細に述べる。

1. 緒 言

近時商用周波数による交流電化が成功を収めたことに刺激されて，直流電気機関車の性能をさらに引き上げることが強く要望されてきた。このたび日本国有鉄道において新形電気機関車 ED 61 の計画に際し，性能改善のための幾多の新しい試みが実施されたが，中でも特筆すべきは粘着特性の改善であろう。従来25%以上は困難とされていた直流電気機関車の粘着特性を30%あるいはそれ以上に引き上げるために，後述のように軸重補償装置，バーニア制御装置および再粘着装置を装備し，また台車は引張力の作用点を低くして軸重移動量を少なくし，駆動装置はクイル式を採用して再粘着を助けるようにした。この結果機関車の1時間定格出力を 1,560kW まで増大しても4軸60tに納めることが可能となったので，電気部分機械部分ともに重量軽減が必要となってくる。このため台車枠は鋼板プレスの全熔接組立とし，主電動機は回転速度を高め絶縁階級をあげて重量の軽減を計った。また勾配の多い線区に使用されるために，重連運転ができ，抑速には電力回生ブレーキを採用している。

以下に従来の直流電気機関車と比較して ED 61 形電気機関車の特異点を述べることにする。

2. 機関車一般仕様

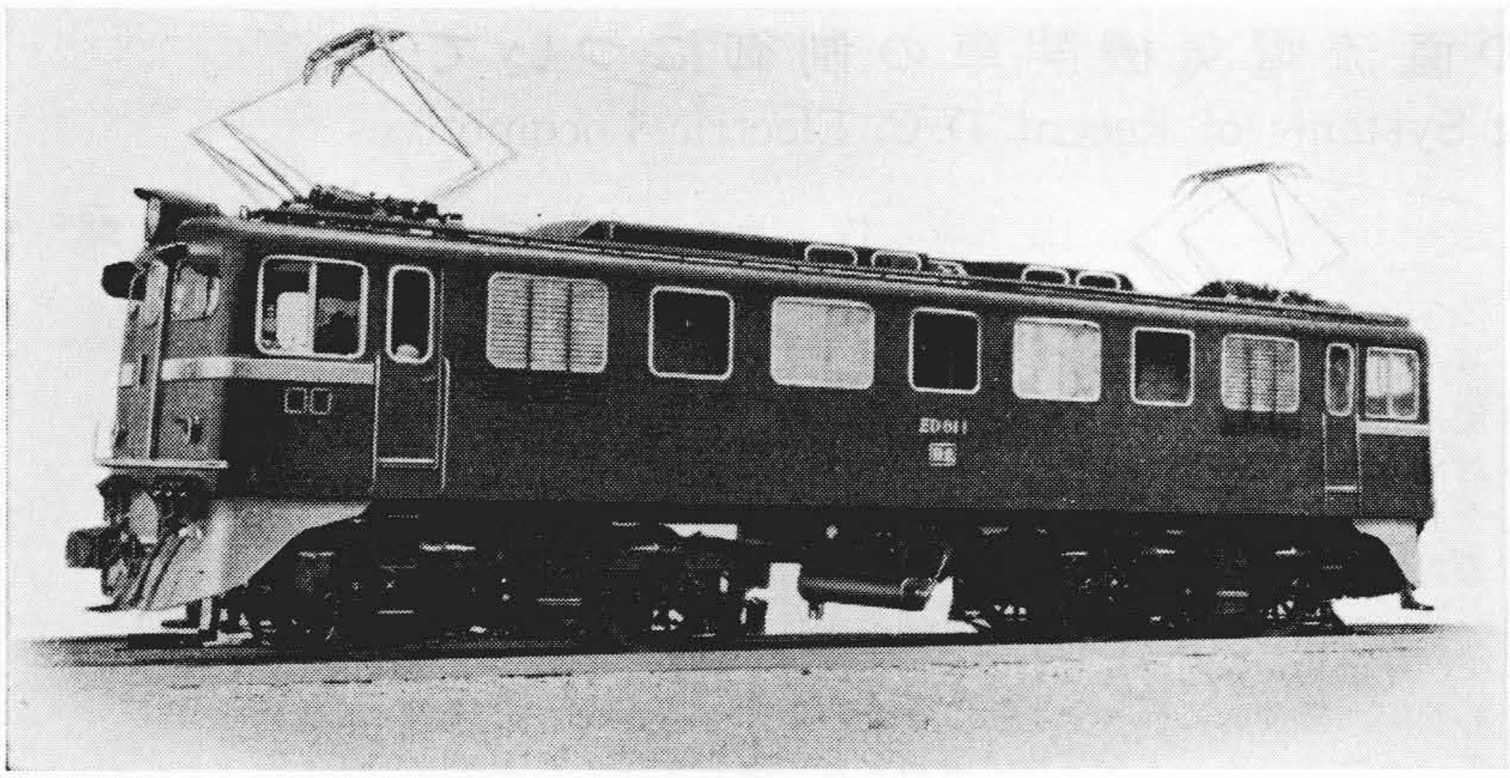
機関車の一般仕様は**第1表**のごとくである。本機関車は25‰の上り勾配において 400t の荷重の引出しが可能で，釣合速度は 40km/h 以上に達する。軸重は 15t 以下で客貨両用機として牽引性能のほかに高速度性能をもあわせもっている。**第1図**に ED 61 形機関車の外観を示す。

第1表 ED 61 形直流電気機関車の一般仕様

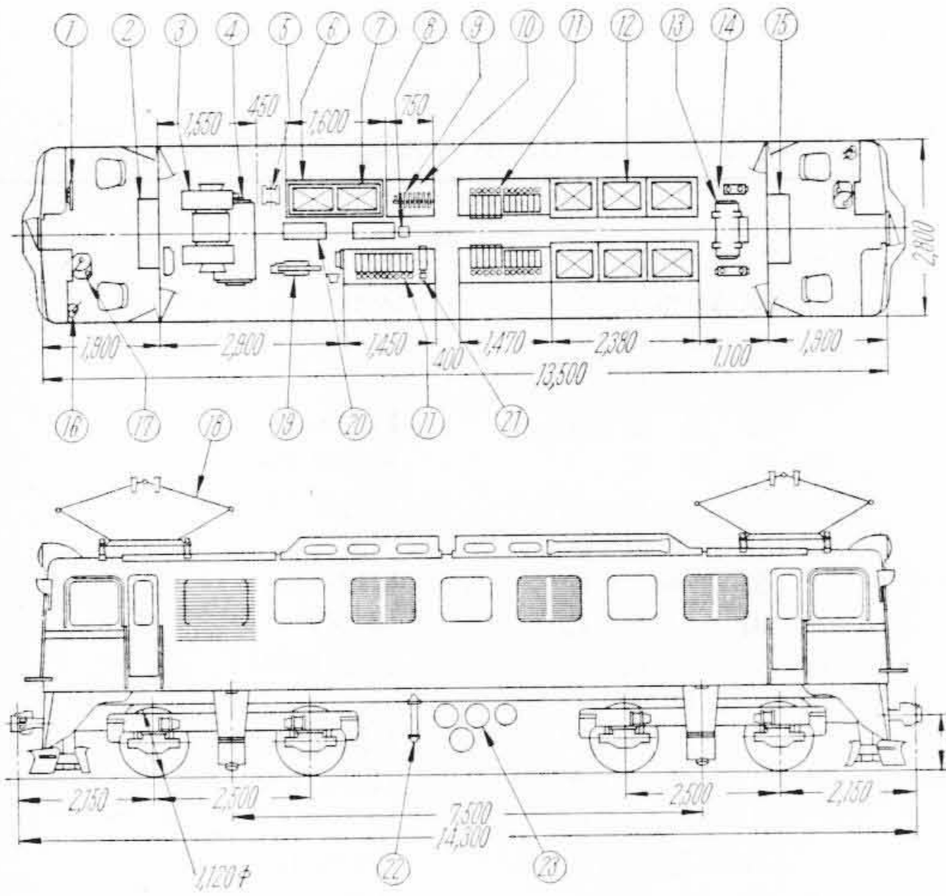
用途	客貨両用
機関車重量	
運転整備時	60t
車輪配置	B-B
機関車全長	
連絡面間	14.3m
車体形式	箱形両運転台
台車形式	揺枕式2軸ボギー
動力伝達装置	中空軸式
動輪径	1,120mm
歯車比	15：82
電気方式	直流 1,500V
機関車性能	
1時間定格出力	1,560kW
1時間定格速度	44km/h
1時間定格牽引力	13t
最高運転速度	90km/h
主電動機	4台
	750V 400kW 575A
	1,200rpm
補機	
電動送風機	1台
	風量 340m³/min
	静風圧 160mm(水柱)
電動空気圧縮機	1台
	ピストン押退容積 3,000l/min
電動発電機	1台
	3kW
制御方式	単位スイッチ式非自動2輌重連総括制御直並列2段制御短絡渡り分路弱め界磁制御
ノッチ数	
直列全界磁	11
直列弱め界磁	4
並列全界磁	9
並列弱め界磁	4
その他	バーニア制御付（カム軸式，自動ノッチ進め方式，アドバンススイッチ付，ノッチ数5）
	軸重移動補償弱め界磁装置付
	電機子分路再粘着装置付

軽量化を計るために，台車枠は鋼板プレスの全熔接組立の台車とし，回転機は定格回転数を高くすることと絶縁向上を行っている。すなわち主電動機の1時間定格回転数は 1,200 rpm で，電機子は特B種，界磁はH種絶縁

* 日立製作所水戸工場



第1図　ED61形電気機関車外観



① 手ブレーキ
② 第一制御箱
③ 電動送風機
④ 励磁機
⑤ 制動転換器
⑥ 補助抵抗器枠
⑦ バーニア制御器
⑧ 急動弁
⑨ 断路器
⑩ 分配弁（下段）
⑪ 単位スイッチ
⑫ 主抵抗器
⑬ 電動発電機
⑭ 電動空気圧縮機（下段）
⑮ 第二制御箱
⑯ ブレーキ弁
⑰ 主幹制御器
⑱ パンタグラフ
⑲ 高速度遮断器
⑳ 誘導分路器
㉑ 手動遮断器
㉒ アフタークーラ
㉓ 空気溜

第2図　ED 61の外形ならびに機器配置

を採用し，従来のMT 42形に比べて，出力が23％増にもかかわらず重量は2,080 kgで約40％減となっている。また主電動機冷却用の電動送風機は従来は2台を使用していたが，連続20 kWのものを1台にし1,800 rpmの高速にして重量の軽減をはかっている。

加速するときの軸重移動量を少なくするために，揺れ枕梁に中心ピン受けを設け，引張力の作用点高さをレール面上325 mmと一般の車に比して低くしてある。

走行するときの振動を小さくするために，軸箱支持は筒形防振ゴムによっており，軸バネ枕バネともコイルバネと防振ゴムを使用している。なお枕バネにはオイルダンパを併用している。

機関車の組立や解体が便利なように，各機器はすべてブロック式取り付けとして，枠組に取り付けたまま車外に取りはずしできる構造である。枠は高圧機器，制御箱，バーニア制御装置，界磁弱め装置などに分けて取り付けられている。第2図にED 61の外形寸法ならびに機器配置を示す。

3. 制御方式の特異点

従来の直流電気機関車の制御方式を一新したものとなっているが，特に顕著な点は次のごときものがある。

3.1 軸重補償

一般に機関車が起動するときは，各動軸上の平衡していた重量にアンバランスを生じ，最も軸重の減少した動軸が空転を起しやすいことになる。したがって最大引張力はこれによって制限される値しか出し得ない。

今これをなんらかの方法で各軸とも各軸の粘着重量に相当した牽引力を与えて100％の粘着重量を利用したとすれば，この補償無しの機関車よりも軽量で，より大きな牽引力を出しうることになる。本機関車はこれを電気的方法，すなわち各軸の粘着重量に比例した牽引力を出すように，各電動機の界磁を調整している。

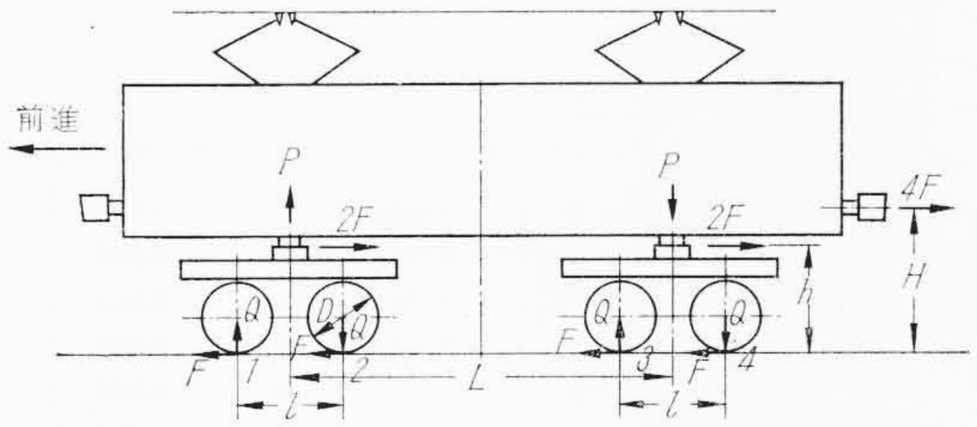
B–B形台車の機関車の起動時の軸重転位は，台車間と台車内におけるものとを別けて考えると，第3図において次式のようになる。

機関車が矢印の方向に起動するとき，これと逆方向の機関車引張力と同一大きさの反力をうけるために，前後の両台車間では

$$P=\frac{4F(H-h)}{L} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

F：動輪周上引張力（1軸当り）

P：引張力$4F$による1台車当りの軸重移動量



H: 車体の引張力伝達点の高さ
h: 車体と台車間の引張力伝達点の高さ
L: 台車間距離
l: 固定軸距離
D: 動輪径
P: 台車間の軸重移動量
Q: 台車内の軸重移動量

第3図　軸重転位説明図

第2表　軸重移動量

動軸番号	軸重移動量	ED60　4F＝15.1 t　のとき平均軸量に対する軸重移動%
第1軸	$-\frac{P}{2}-Q$	−12.1
第2軸	$-\frac{P}{2}+Q$	＋ 2.2
第3軸	$+\frac{P}{2}-Q$	− 2.2
第4軸	$+\frac{P}{2}+Q$	＋12.1

次に各台車内の軸重移動量Qは次の式のようになる。

$$Q=\frac{2F\,h}{l} \quad \cdots\cdots(2)$$

このPおよびQを各動軸ごとに集計し，動輪周上の全引張力$4F$を15.1 tすなわち起動電流が約700 Aの場合について計算すると**第2表**のようになる。

実際は引張力が低いとき軸重移動量が少なく，この引張力に対しては十分な粘着重量があるから，空転は考えられない。したがって粘着重量一杯の引張力の点で完全補償をなしうるように主電動機の弱め率を選定している。また第2および第3軸の軸重移動量の差は僅少であるから，制御方式が複雑化するのを避け，この両者の軸重転位量は無視して同一軸重とみなしている。結局第1，第4軸，ならびに第2と第3軸は同一の3グループに対して，相対的に補償率を変え，各軸の粘着重量に比例した引張力が得られるようにしている。その値は次のごとくである。

電動機順位	前進の場合	後進の場合
第1	54.3 %界磁	100 %界磁
第4	100 %界磁	54.3 %界磁
第2および第3	71.5 %界磁	71.5 %界磁

機関車の前進と後進における軸重移動は，第1と第4軸間ならびに第2と第3軸間で互に逆転するから，第1と第4主電動機を永久直列に，第2と第3主電動機を永久直列に接続することによって，逆転器による機関車の前後進切り換えと同時に軸重補償率も転換させることができる。

運転台の補償スイッチを投入すると，補償を必要とする引張力以上に達すれば主回路の電流継電器により主電動機界磁スイッチを投入する。電機子電流が所定の値以下に減少すると，電流継電器の接点を開放し補償界磁を打ち切って全界磁に自動的にもどる。また補償界磁弱め中補償スイッチを切る場合，主幹制御器のハンドルを高速弱め界磁に進めた場合，および直並列の渡りの場合はいずれも補償界磁弱めは打ち切られる。

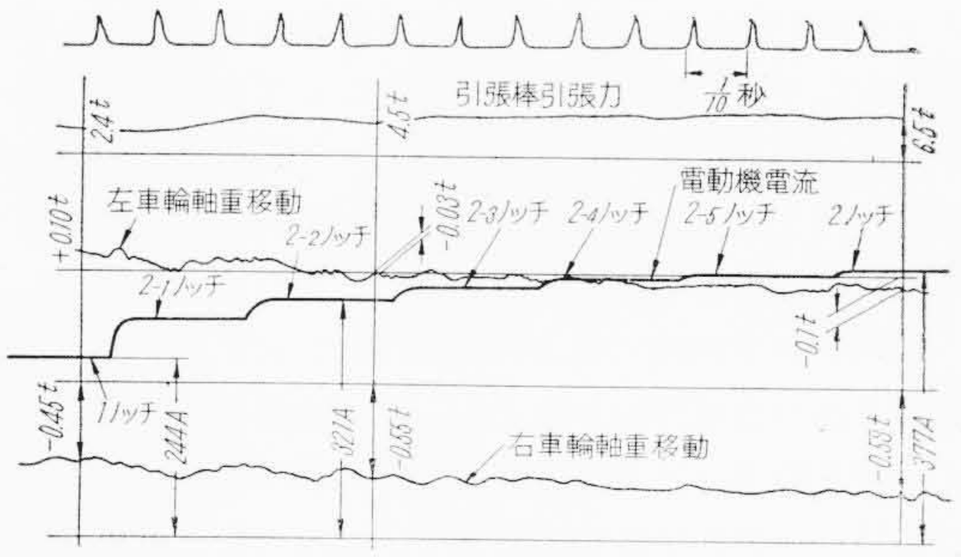
故障電動機開放時における軸重補償は，第1，第4電動機群開放のときには行われないが，第2，第3電動機群開放の場合は第1，第4電動機間で軸重補償を行うことができる。

なお回生ブレーキ時には軸重補償されぬようになっている。

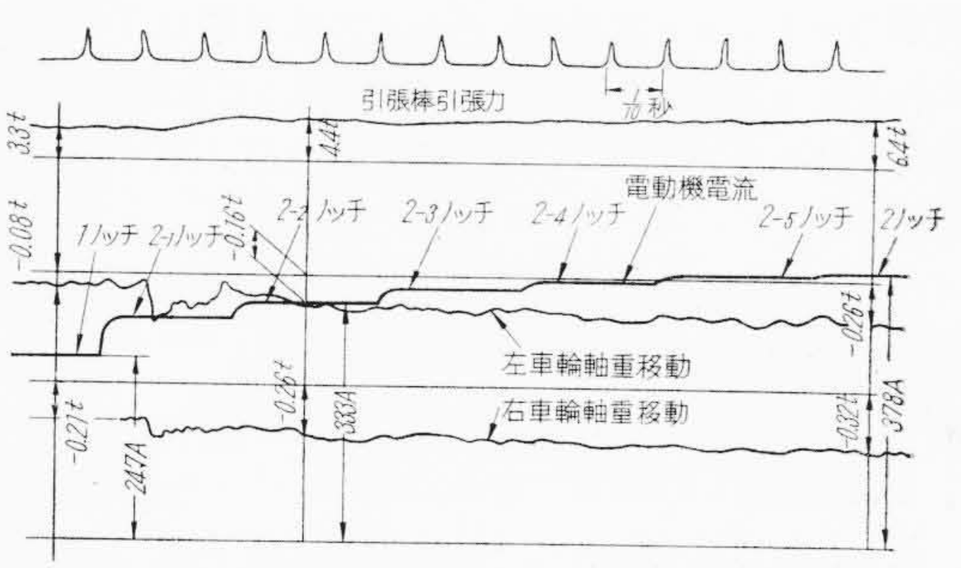
主電動機の弱め界磁による軸重補償の効果を，工場試験でも確認できたが，その一端を**第4図**と**第5図**のO.S.C.の比較で知ることができる。

3.2　バーニア制御

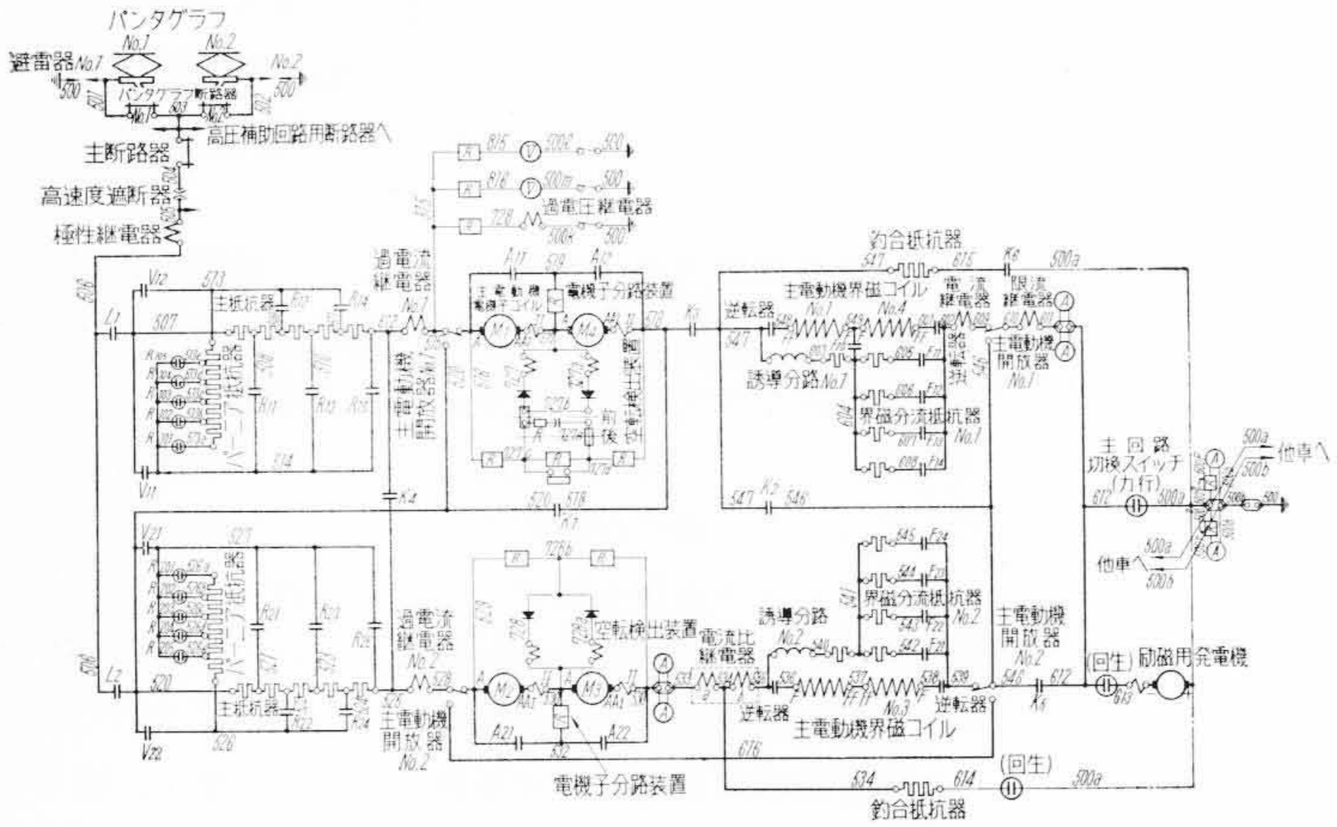
従来から機関車の起動時の起動電流変化すなわち尖頭電流による牽引力の変化を少なくし，乗心地を改善することと起動牽引力を増大することが要求されてきた。こ



第4図　軸重補償効果試験 O.S.C.（補償なし）



第5図　軸重補償効果試験 O.S.C.（補償あり）



第6図　ED61 主　回　路　つ　な　ぎ

直　列		並　列	
ノッチ	抵　抗　値	ノッチ	抵　抗　値
1	5.94Ω	12	0.882Ω
2	3.69	13	0.690
3	2.76	14	0.545
4	2.24	15	0.432
5	1.74	16	0.322
6	1.34	17	0.236
7	0.96	18	0.153
8	0.66	19	0.088
9	0.38	20	0.000
10	0.14		
11	0.000		
$T_{1\sim3}$	0.460		

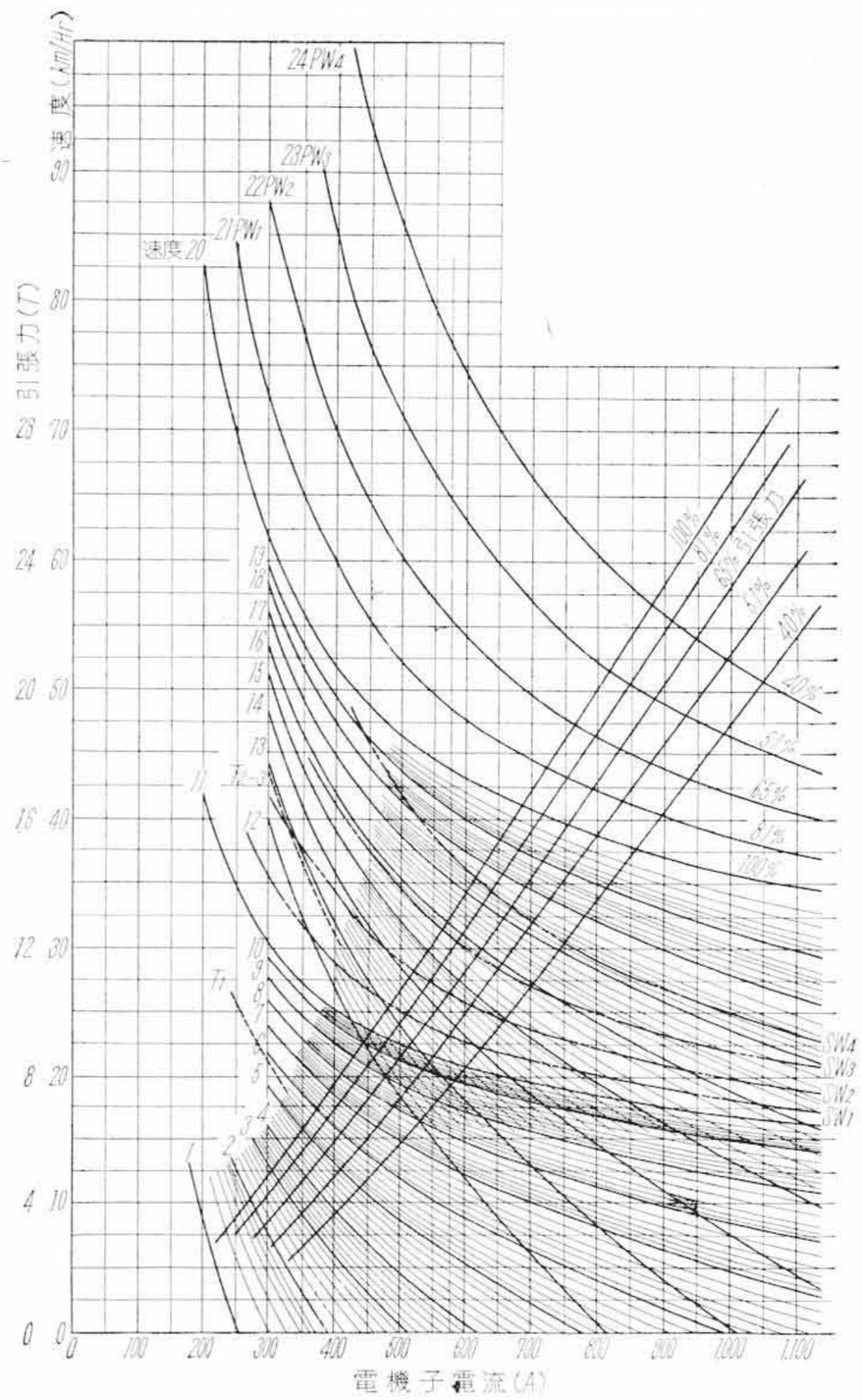
れは起動ノッチ数を増すことによって解決できるが，起動抵抗器の短絡用接触器数が増し，非自動ノッチ進めのときは主幹制御器が大きくなって操作が困難となる。

今従来の起動抵抗器のある一つのセクションに，副抵抗器であるバーニア抵抗器を並列に入れ，バーニア抵抗値を最大から0まで変化させると，起動用主抵抗器の一つのセクションに対しバーニア抵抗器のセクション数に比例したノッチ数を得ることができる。主抵抗器のセクション数をN，バーニア抵抗器のそれをnとし，主抵抗器の全セクションに対しバーニア抵抗器を最大から0まで反復使用することによって，$(n+1)N+1$ で与えられるノッチ数が得られ，抵抗器短絡用接触器そのほかを極度に増したり制御装置を複雑にすることなく，飛躍的にノッチ数を得ることができる。バーニア抵抗器の短絡を自動的に行うと，バーニア制御を行わないときとほぼ同一の主幹制御器となって操作も容易となる。

ED61 の主回路つなぎは**第6図**に示すように，主電動機2群の直並列切り換えと，主抵抗器の直並列切り換えを行うので，バーニア抵抗器も2群に別れている。ただしバーニア抵抗器の短絡あるいは投入を2群を同時に行うようにすれば，操作は簡単になり，カム電動機ならびにカム軸各1個で2群を制御できるようになる。主抵抗器のセクション数が10，バーニア抵抗器は1群当りのセクション数が5で直並列制御を行うことによって，総計110ノッチを得ている（**第7図**力行ノッチ曲線参照）。

バーニア制御に関して実際の操作上ならびに保護に関する特長をあげると下記のとおりである。

（1）　バーニア制御は必要に応じいずれのノッチからでも使用あるいは開放できる。ただしバーニア制御中開放したときは自動的にバーニア抵抗が「切」位置まで進み停止する。



線電圧：　1,500V，　電動機形式：　MT49，
電動機定格：　400kW，750V，575A，1h　　電動機個数：　4個
動輪上重量：　60t
動輪直径（計算用）：　1,080mm　　歯数比：　82：15

第7図　力　行　ノ　ッ　チ　曲　線

（2）　直列と並列の渡りではバーニア制御は行われないが，バーニア制御途中で渡っても誤動作なく並列のバーニア制御を続行する。

（3）　バーニア制御途中で主幹制御器の主ハンドルを「切」位置までもどしたときは，逆転ハンドルが「前」

「後」のいずれかに投入されている以上，常に自動的に0位置まで進みそして停止する。

(4)　バーニア制御中空転を生ずると，再粘着完了までの期間はノッチ進めが停止するようになっている。

(5)　バーニア制御はいずれの1群の主電動機を開放しても平常どおり作用させることができる。

(6)　回生ブレーキ時はバーニア制御が電気的に開放される。

(7)　バーニア制御は重連あるいは非重連にかかわらず，同一操作で良くまた同様に運転される。

以上のようにあらゆる運転に際して誤動作なくバーニア制御できるが，バーニア制御の動作時間は空ノッチで約1.5～2.0秒に設定されている。また700Aの電機子電流を限流値としてノッチ進めを行うときに，主抵抗器のノッチ間尖頭電流が125％前後にも達するが，バーニア制御を行うとその尖頭電流は103.5％程度に大幅に減少することができる。

次にバーニア抵抗器の容量は次のようにして算出される。

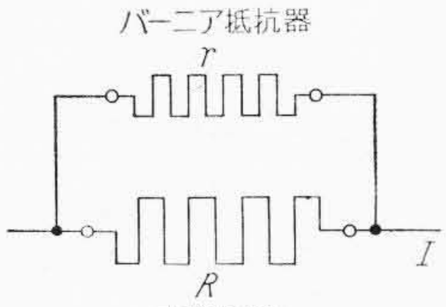
第8図においてバーニア抵抗が時間tに対して直線的に最大から0まで変化すると仮定すると，時間tにおけるバーニア抵抗値 $r(t)$ は

$$r(t)=-\frac{t}{T}r+r \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

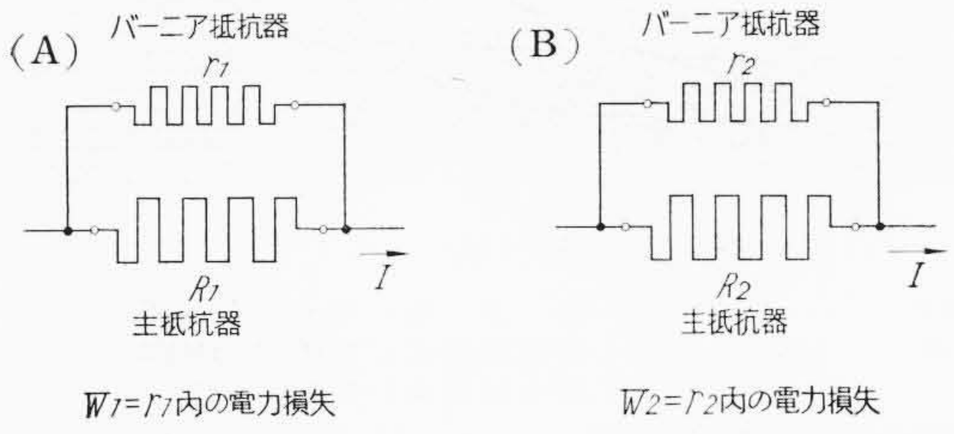
で表わされ，バーニア抵抗器内での損失電力量は次式で示される。ただし I を一定とする。

$$W=\int_O^T\left(I\frac{R}{r(t)+R}\right)^2 r(t)\,dt$$

$$W=\frac{I^2R^2T}{r}\left(-\log\frac{R}{r+R}-1+\frac{R}{r+R}\right)\cdots\cdots\cdots(4)$$



第8図　バーニア抵抗器説明図（1）



第9図　バーニア抵抗器説明図（2）

(4)式で各主抵抗器のセクションの抵抗値 R ならびにバーニア抵抗器の使用時間 T について総計すると，全電力量となるがこれをバーニア抵抗器のセクションごとに容量を選別するためには次式のごとくする。

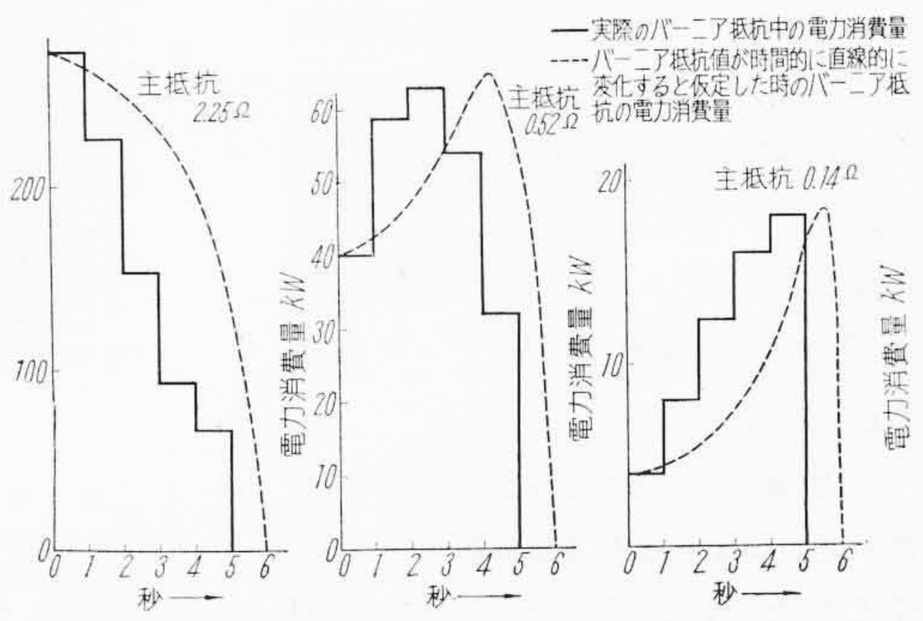
第9図において(A)ならびに(B)におけるような主抵抗器ならびにバーニア抵抗器の組合せのときの電力損失比 W_1/W_2 は，

$$\frac{W_1}{W_2}=\frac{r_1}{r_2}\left(\frac{R_1}{R_2}\right)\left(\frac{r_2+R_2}{r_1+R_1}\right)^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

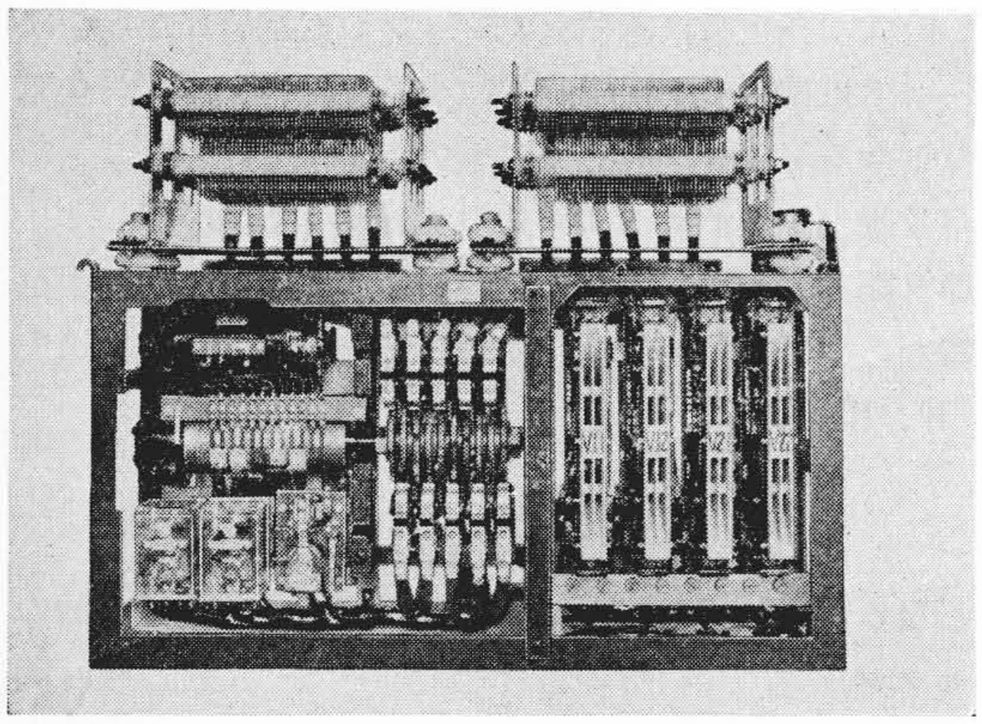
となる。(5)式によって主抵抗器とバーニア抵抗器の全セクションについての組合せでバーニア抵抗器相互間の損失比が算出される。したがって(4)式で算出せる全電力量を(5)式で定った損失比に別けると，バーニア抵抗器各セクションの必要とする容量を得ることになる。

実際 ED 61 形機関車の主抵抗器とバーニア抵抗器との組合せで，バーニア抵抗器で失われる電力損失を時間に関して描くと**第10図**のようになり，時間に対し直線的に変化すると仮定したときと実際の電力損失とが時間とともに一致するのは，主抵抗とバーニア抵抗の双方の抵抗値によって決まり限られた時間だけであるが，損失量としては実用上差しつかえない程度である。

概観を**第11図**に示すように，2群のバーニア抵抗器は日立スティールグリッド抵抗器で，枠に対し二重絶縁で取り付けられている。この2群の抵抗制御には，枠内左上部のカム電動機から2段減速されて回転する1本のカム軸で開閉する10個のカム接触器による。右には主抵抗器のいずれかのセクションに対し並列に投入あるいは開放するバーニア単位スイッチ4個を有する。カム電動機ならびにバーニア単位スイッチの制御ならびに保護のために，短絡継電器 1，選択継電器 2，アドバンス継電器 1，ならびに制御回路抵抗管1式を最小の空間になるように配列されている。制御回路の簡略化と断線事故の場合でもバーニア制御を行わない運転ができるように，バーニア単位スイッチは off 電磁弁を使用したこと，回路の遮断は単位スイッチで行うから，カム接触器はアー



第10図　バーニア抵抗器の電力消費量の比較



第11図　バーニア制御器外観

ク流しを取り付けないこと，カム軸は半回転180度ずつを主抵抗器1ノッチ分に相当するように，カム接触器を上下に配列したことなどが注目される。

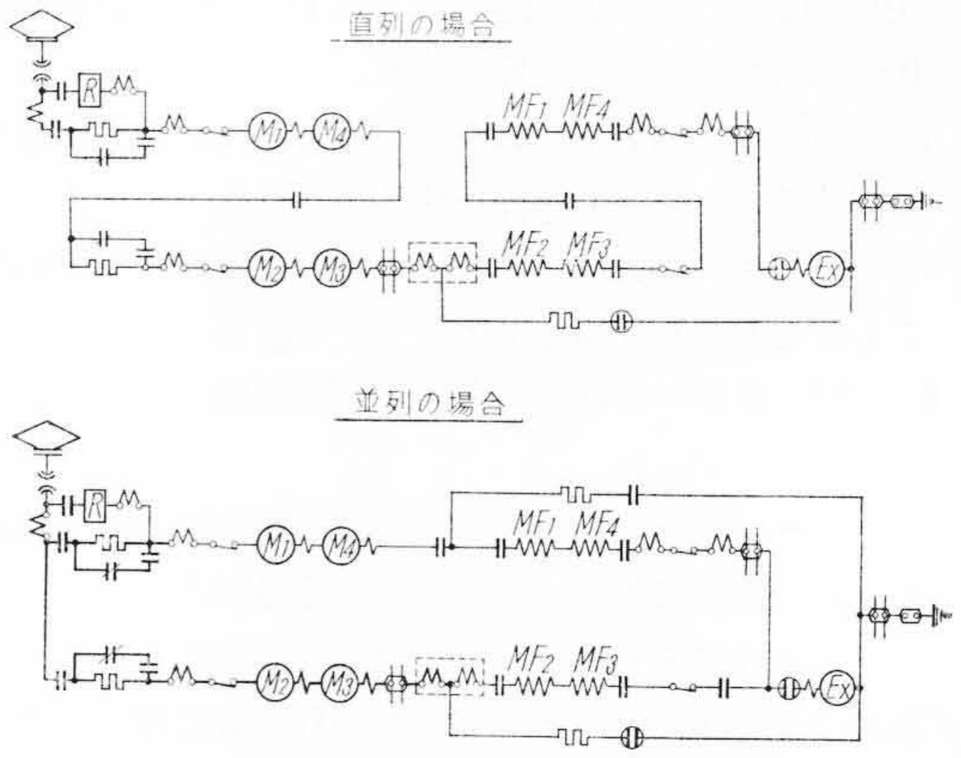
3.3　空転検出ならびに再粘着方式

従来の機関車においては空転のときに2個の主電動機の端子電圧差を継電器により検出し，動輪踏面軌道上に砂まきを行い，空転が進展するときは，ノッチ戻しによる機関車全体の牽引力の減少でそれを防止する消極的な方法によっていた。今回採用した方法は，2個の主電動機端子電圧差を継電器により検出する方法には変りなく，砂まきを行うと同時に空転を起した動輪の主電動機のみ電機子を分路抵抗器によって分路し，一時的に牽引力を減少させて再粘着の機会を与えるようにしている。したがって残りの健全な主電動機に対しては，回転力を低下させることなく運転を継続するものである。なお実際の運転に際して下記を考慮してある。

（1）　主電動機の特性の差異，動輪の摩耗ならびに継電器の動作特性の差異などで正常運転のとき，誤動作しないように逆流阻止用セレン整流器を使用し，継電器4個によっていずれの動輪の空転かを検出できる。

（2）　前述のように第2，第3電動機は軸重補償のための界磁弱め率が同一であるから問題ないが，第1と第4電動機は正常運転時でも軸重補償のため，大幅に端子電圧が異なるから誤動作がないように，継電器用抵抗器を前後進いずれかによって挿入補正している。

（3）　軸重補償は機関車運転中に投入されるから，過渡期の誤動作をなくするため，コンデンサを補償抵抗器に付加して使用する。



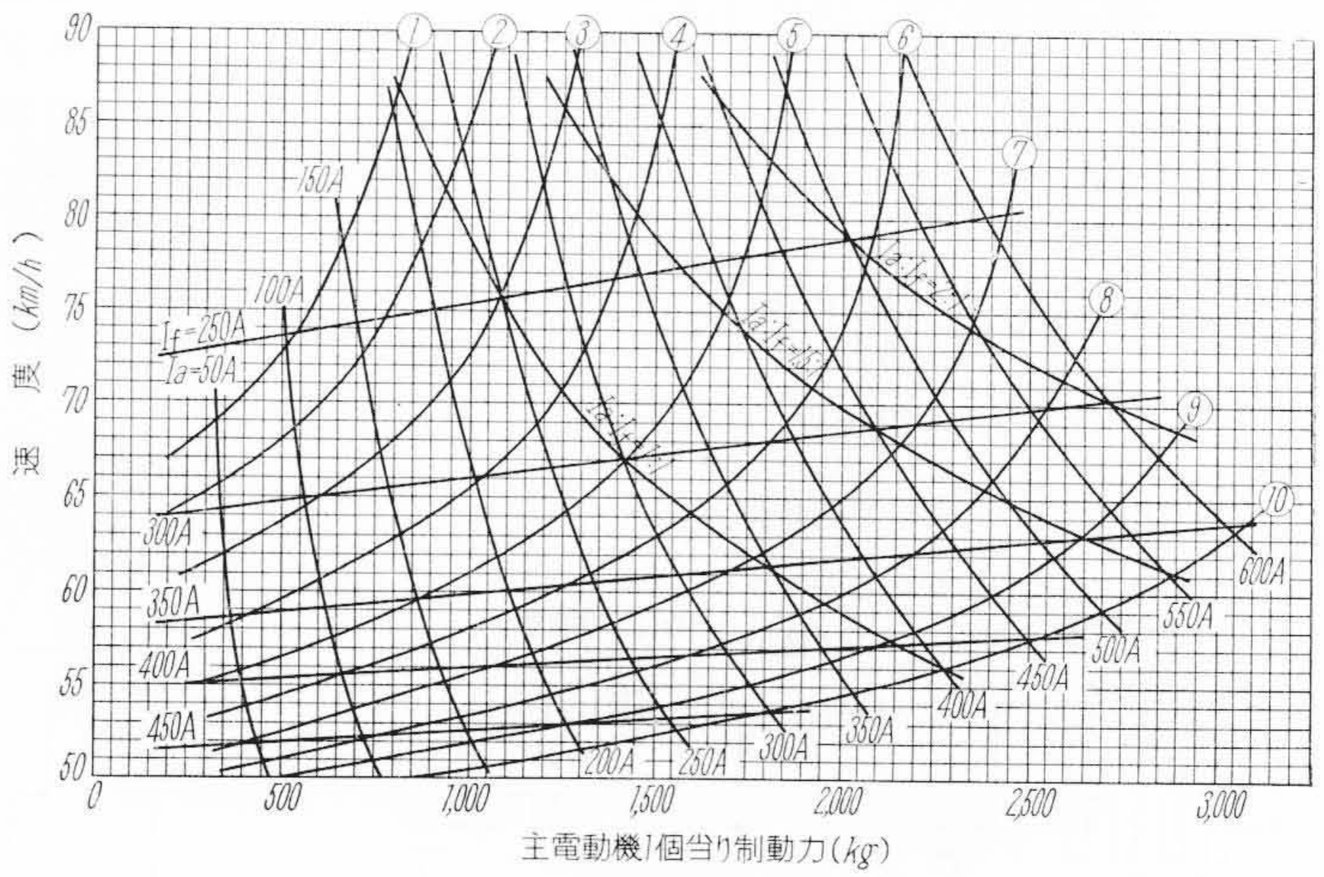
第12図　ED61回生制動説明図

3.4　電力回生ブレーキ

勾配線における列車の抑速用としては，従来空気ブレーキや電気ブレーキなどが使用されていたが，最近電力の経済面からも変電所容量の節約の面からも電力回生ブレーキを採用する気運がみられる。

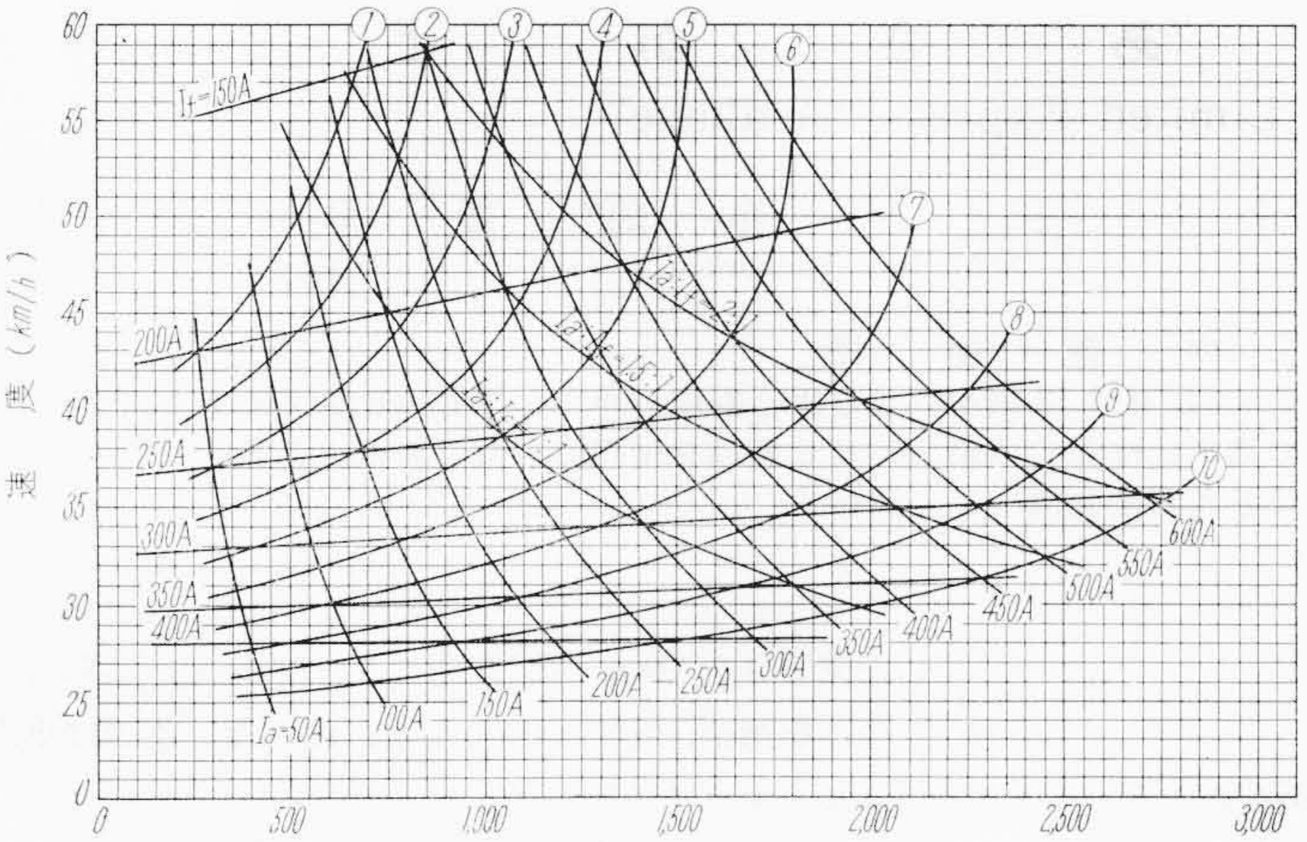
本機関車は勾配線の使用を考慮して**第12図**に示すように主電動機界磁を直列あるいは並列に接続して励磁機により他励する。また電機子も直並列切り換えを行うことによって90 km/hの高速度から約25 km/hの低速度まで高範囲にわたり，回生ブレーキを使用することができる。

重連で回生ブレーキ中の制御負荷を平衡させるために励磁機の界磁調整によって自由に制動力を調整できること，ならびに回生ブレーキ不能のときは空気ブレーキが自動的にかかるようにしたことなどが従来のものと変っ



線　電　圧：1,600V
主電動機形式：MT49
主電動機個数：4
動輪直径：1,120mm（計算1,080mm）
歯　車　比：15：82＝1：5.47
励磁機形式：MH58B-DM31B
釣合抵抗値：0.03Ω（20℃）

第13図　ED61形回生制動ノッチ曲線（並列）



線　電　圧：1,600V
主電動機形式：MT49
主電動機個数：4
動輪直径：1,120mm(計算1,080mm)
歯　車　比：15：82＝1：5.47
励磁機形式：MH58B-DM31B
釣合抵抗値：0.03Ω（20℃）

第14図　ED61回生制動ノッチ曲線（直列）

た特長といえる。第13図と第14図にブレーキノッチ曲線を示す。

4. 結　　言

以上に述べたように本機関車は直流のものとして従来にない種々の新しい方式を採用し，新設計の装置を装備して今年8月に完成し斯界注目のうちに日本国有鉄道に納入された。その性能については11月末より各種の詳細な試験が行われることになっているが，予期どおりの性能が発揮されるであろうと信じている。そしてこれが今後の直流電気機関車の発達の一つの指針となるであろうことと思う。ことに日立がその設計を担当したバーニア制御器の成果が期待される。

終りに本機関車の計画ならびに製作に終始御指導を賜わった日本国有鉄道各位に深甚なる謝意を表する次第である。

特　許　と　新　案

最近登録された日立製作所の特許および実用新案　（その5）

（第35頁より続く）

区　別	登録番号	名　　称	工場別	氏　　名	登録年月日
実用新案	482879	液体断続流下装置	多賀工場	黒羽逸平 桜井恒文	33.10. 8
〃	483365	ホイスト用メカニカルブレーキ	多賀工場	横内直中 古市光之	33.10.17
〃	483366	ホイスト用メカニカルブレーキ	多賀工場	横内直中 古市光之	33.10.17
〃	482551	X線写真速写装置	亀戸工場	和田正脩 小林長平 安藤文蔵	33.10. 1
〃	482569	回転電機の集電装置	亀戸工場	橋本勲一 磯本正義	〃
〃	482575	アイソトープ容器	亀戸工場	和田正脩	〃
〃	482577	高電圧変圧器のタップ切換装置	亀戸工場	和田正脩	〃
〃	482583	電圧調整装置	亀戸工場	和田正脩 小林長平 安藤文蔵	〃
〃	482584	巻鉄心形変圧器	亀戸工場	藤江進	〃
〃	482590	通風タクトを有する鋳込籠形回転子	亀戸工場	磯本正義	33.10. 1
〃	482858	変圧器ケース	亀戸工場	中島敏夫	33.10. 8
〃	482555	電鍵取付枠	戸塚工場	田島喜太平 三井忠夫 大沢竜二郎 中山栄松 小島淳敏	33.10. 1
実用新案	482556	インパルス修正装置	戸塚工場	北村敏一 木村慮	33.10. 1

（第79頁へ続く）