直流電気鉄道における上下線一括き電方式

正 員 秦泉寺 敏 正 (東 芝)

正 員 吉 舗 幸 信 (東 芝)

正 員 大 塚 克 昌 (阪急電鉄)

正 員 浅 野 伸 也 (阪急電鉄)

1. ま え が き

電気鉄道は電車および電力、保安、通信などの各設備が有機的に運営される巨大なシステムで、き電系統はこのシステムの重要な構成要素の一つである。従って、電気鉄道を円滑に運営するためには、き電方式、き電保護、パンタ点電圧の確保あるいは保守について十分に検討をする必要がある。ことに、近年は電力料金が高騰しているので、電力消費量を減らすことが重要な課題になっている。電力消費量は電車ばかりでなく、電力変換装置およびき電系統の構成による度合いも大きい。

さて、直流電気鉄道の複線区間において、直流変電所から両方面の電車に電力を供給する電線路は、き電線ごとにき電用高速度遮断器を設けて各き電線を分離させた分割き電方式が主流になっている。しかし、阪急電鉄は上下線のき電用高速度遮断器およびき電線を集約し、1回線にした一括き電方式のほうがき電保護を経済的で、しかも確実に実行する利点に着目し、神戸線、宝塚線および京都線（梅田 - 西院間）で一括き電方式を採用している。分割き電方式および一括き電方式の構成を図1に示す。一般に、き電系統はき電保護の立場から、図で明らかにしたように、負荷に対して隣接する直流変電所から並列にき電する並列き電方式がとられている。

電車は頻繁にオン・オフを繰返す極めて変動が大き

い負荷である。従って、一般に直流変電所の電力変換装置には短時間の過負荷容量を大きくしたD種定格が適用されている⁽¹⁾。分割き電方式によると、各き電線の負荷変動は電力変換装置のそれよりも著しく大きい。このため、一括き電方式を適用すると、負荷の状況によっては、き電線の電圧降下が小さくなり、き電損失も減ると思われる。最近、チョップ制御による回生ブレーキ方式が目覚しく普及しているが、一括き電方式は、上りと下りとの電車で効果的に回生エネルギーの授受を行わせることが期待できるので、魅力が増してきた。

さきに、直流き電回路の保護について詳細な調査報告書が出されている⁽²⁾。また、変電所の中間点で上下線のき電線を並列に接続したき電タイポスト方式について言及した文献がある⁽³⁾⁽⁴⁾。き電タイポスト方式は一括き電方式の変形とみなせる。しかし、一括き電方式を主題にした研究は見あたらない。

本論文では、まず一括き電方式について解説を行い、一括き電方式のほうが有利と考えられる理由を述べる。次に、変電所における直流き電回路の故障検出能力について解析を行う。その後で、阪急電鉄京都線

図1 直流電気鉄道の直流き電方式

Fig. 1. DC networks applied to DC electric railways.

A Study on The Double Track DC Electric Railway DC Feeders Tied with Equalizers. By Toshimasa Jinzenji, Member (Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Toshiba Corp.), Yukinobu Yoshitaki, Member (Transportation Systems Engineering Department, Toshiba Corp.), Yoshimasa Ohtsuka, Member & Shinya Asano, Member (Electrical Department, Hankyu Corp.).

秦泉寺敏正：正員，(株)東芝 重電技術研究所
吉舗幸信：正員，(株)東芝 交通システム技術部
大塚克昌：正員，阪急電鉄(株)電気部
浅野伸也：正員，阪急電鉄(株)電気部

を例にあげ、一括き電方式と分割き電方式とについて消費電力に着目したシミュレーションを行い、相互の比較を行う⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

2. 上下線一括き電方式

上下線一括き電方式とは、上下線のき電用高速度遮断器、およびき電線を一回線に集約したき電方式をいう。集約されてないき電方式と上下線一括き電方式とを区別したいときは、前者を上下線分割き電方式という。上下線分割き電方式は一括き電方式から派生したものとみなせる。阪急電鉄の一括き電方式は、上下線のき電線を均圧線で 250 m ごとに短絡している。

近年、大都市の電気鉄道は列車の長編成化と運行の過密化とが著しい。この傾向は、き電線または電車線が断線垂下してレールや電車に触れるアーク故障を生じたとき、故障を正確に検出し、き電用高速度遮断器で遮断するき電保護を困難にしている。上下線一括き電方式によると、後の解析で明らかにするように、アーク故障電流の定常値を大きくできる。 ΔI 形き電線故障選択装置の目盛値は分割き電方式と同じでよいと考えられるので、負荷電流と故障電流との識別が容易になり、故障検出区間を広げられる利点がある。

一括き電方式のその他の長所として、

- (i) 89 F き電用断路器, 54 F き電用高速度遮断器, 50 ΔI 形き電線故障選択装置などの変電機器の数を半分にできる。このため、保守の工数が減る
 - (ii) 上下線間にわたり線を設けると、セクションが不要になり、それに伴い列車通過時の安全性が増す
 - (iii) き電線の電圧降下が小さい
 - (iv) き電線の電力損失が小さい
 - (v) き電線の熱容量からくる制約を緩和できる
- (iii)~(v)項は、第4章で京都線における具体例について述べる。

一方、一括き電方式の短所は、

- (i) 54 F の目盛値が高いので、過負荷を遮断したとき接点の荒損が大になる
 - (ii) 片線の送電停止事故時に健全回線のみ送電して単線の運転を継続させることができない
- 一括き電方式は、地下鉄およびモノレールのように非常時に乗客を避難させるために、片線の運転を継続させる必要がある路線には適用できない。

最近、サイリスタ遮断装置が普及のきざしをみせている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。サイリスタ遮断装置は高速度遮断器よりも高価であるから、一括き電方式はサイリスタ遮断装置

の普及をうながす条件を備えている。

3. 54 F および 50 F によるき電保護

き電保護の立場から、連絡遮断の手段によらずに、アーク故障電流を確実に遮断できることは望ましいことである。アーク故障がき電回路の末端で生じたとき、 ΔI 形き電線故障選択装置はき電保護に重要な役割を果たしている。アーク故障電流の大きさは線路定数および故障点によって異なる。54 F および 50 F の動作と関連が深いアーク故障電流の定常値および突進率を解析するために、次の仮定を行う。

- (i) 負荷電流の大きさは零
 - (ii) 一括方式の電線路の抵抗は分割方式の 1/2
- アーク故障を生じたとき、図1(a), (b)はそれぞれ図2および図3に示した等価回路で表すことができる。なお、この論文に使用する主な記号は次のとおりである。

- E_j : j 変電所の無負荷電圧
- E_k : k 変電所の無負荷電圧
- E_a : アーク電圧
- I_j : j 変電所のき電線引出口を流れる故障電流, 定常値
- I_k : k 変電所のき電線引出口を流れる故障電流, 定常値
- I_l : き電線内を環流する故障電流, 定常値

図2 分割き電方式の等価回路

Fig. 2. Equivalent DC feeder circuit without equalizer.

図3 一括き電方式の等価回路

Fig. 3. Equivalent DC feeder circuit with equalizers.

I_D : j 変電所のき電用高速度遮断器を流れる故障電流, 定常値

i_j : j 変電所のき電線引出口を流れる故障電流, 瞬時値

i_k : k 変電所のき電線引出口を流れる故障電流値, 瞬時値

i_i : き電線内を環流する故障電流, 瞬時値

i_D : j 変電所のき電用高速度遮断器を流れる故障電流, 瞬時値

R_j : j 変電所の内部抵抗

R_k : k 変電所の内部抵抗

R_a : アーク抵抗

R_f : j 変電所と k 変電所間のき電線一条あたりの抵抗

R_r : j 変電所と k 変電所間のレールの抵抗

L_j : j 変電所の内部インダクタンス

L_k : k 変電所の内部インダクタンス

L_f : j 変電所と k 変電所間のき電線一条あたりの自己インダクタンス

M_f : j 変電所と k 変電所間のき電線の相互インダクタンス

k : 故障点までの距離比

〈3.1〉 アーク故障電流の定常値 アーク故障電流の定常値を求めるとき, 回路インダクタンスは零と置くことができる。図2を基にして, 分割き電方式でアーク故障を生じたとき, 各変電所のき電引出口を流れる故障電流の定常値について次式が成立する。

$$[I] = [R^{-1}][E] \dots\dots\dots (1)$$

ここで,

$$[E] = \begin{bmatrix} E_j - E_a \\ E_k - E_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} I_j \\ I_k \\ I_i \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_j + k(R_r + R_f) + R_a & & \\ & R_a & * \\ & k R_f & \\ & & R_a \\ * & R_k + (1-k)(R_r + R_f) + R_a & * \\ & & - (1-k) R_f \\ & & k R_f \\ * & - (1-k) R_f & \\ & & 2 R_f \end{bmatrix}$$

$$I_D = I_j + I_i \dots\dots\dots (2)$$

次に, 図3を基にして, 一括き電方式でアーク故障を生じたとき, 故障電流の定常値について次式が成立する。

$$[I] = [R^{-1}][E] \dots\dots\dots (3)$$

ここで,

$$[E] = \begin{bmatrix} E_j - E_a \\ E_k - E_a \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} I_j \\ I_k \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_j + k(R_r + R_f/2) + R_a & \\ & R_a \\ * & R_k + (1-k)(R_r + R_f/2) + R_a \end{bmatrix}$$

(2)式と(3)式とから得た解の比を求めると, 一括き電方式にしたとき, どれだけ故障電流を大きくできるかわかる。

き電用高速度遮断器あるいは ΔI 形き電線故障選択装置が⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾, そのき電区間で変電所からどれだけ遠い故障点を検出できるのかを表す目安として,

故障検出区間率=故障検出区間/変電所間隔が使われている⁽¹¹⁾。分割き電方式と一括き電方式との優劣は, また故障検出区間率の差で比較できる。

〈3.2〉 アーク故障電流の突進率 アーク故障電流の突進率を求めるとき, 回路抵抗を零とおくことができる。図2を基にして, 分割き電方式でアーク故障を生じたとき, 各変電所のき電引出口を流れる故障電流の突進率について次式が成立する。

$$[D] = [L^{-1}][E] \dots\dots\dots (4)$$

ここで,

$$[E] = \begin{bmatrix} E_j - E_a \\ E_k - E_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad [D] = \begin{bmatrix} di_j/dt \\ di_k/dt \\ di_i/dt \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_j + k L_f & & 0 \\ 0 & L_k + (1-k) L_f & * \\ k(L_f - M_f) - (1-k)(L_f - M_f) & & k(L_f - M_f) \\ * & - (1-k)(L_f - M_f) & \\ & & 2(L_f - M_f) \end{bmatrix}$$

$$di_D/dt(t=0) = di_j/dt + di_i/dt \dots\dots\dots (5)$$

次に, 図3を基にして, 一括き電方式の故障電流の突進率について次式が成立する。

$$[D] = [L^{-1}][E] \dots\dots\dots (6)$$

ここで,

$$[E] = \begin{bmatrix} E_j - E_a \\ E_k - E_a \end{bmatrix} \quad [D] = \begin{bmatrix} di_j/dt \\ di_k/dt \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_j + k(L_f + M_f)/2 & \\ 0 & \\ * & L_k + (1-k)(L_f + M_f)/2 \end{bmatrix}$$

〈3.3〉 アーク故障電流の計算例 一例として, 阪急電鉄京都線大山崎変電所-向日町変電所間における故障点と大山崎変電所のき電用高速遮断器より流れ

出すアーク故障電流の定常値と突進率との関係を求め、図4および図5に示した。大山崎変電所と向日町変電所との距離は6.9 km である。この変電所間隔は阪急電鉄としては一番長い部類に属している。回路定数は表1のとおりである。

図4のアーク故障電流の大きさを比較すると、故障点が大山崎変電所から遠ざかると一括き電方式の故障電流が分割き電方式の故障電流より大きくなり、向日町変電所直下でアーク電圧が300 V のとき両者の比は2倍になっている。表2に大山崎変電所および向日

図4 アーク故障電流の定常値

Fig. 4. Steady state arc fault current.

図5 アーク故障電流の突進率

Fig. 5. Arc fault current rise rates.

表1 アーク故障電流の計算に使った回路定数
Table 1. Circuit constants applied to arc fault current analysis.

項 目	数 値
大山崎変電所の内部抵抗 (Ω)	0.042
向日町変電所の内部抵抗 (Ω)	0.0265
き電線抵抗 (Ω/km)	0.042
き電線自己インダクタンス (mH/km)	1.2
き電線相互インダクタンス (mH/km)	0.8
レール抵抗 (Ω/km)	0.00628
アーク電圧 (V)	0, 100, 200, 300
アーク抵抗 (Ω)	0.0324
大山崎変電所の無負荷電圧 (V)	1,613
向日町変電所の無負荷電圧 (V)	1,606

表2 き電用高速度遮断器およびΔI形き電線故障選択装置の検出区間率

Table 2. % limit of Fault detection distance obtained by high speed circuit breakers and ΔI relays.

保 護 装 置		大山崎 SS		向日町 SS	
		分 割	一 括	分 割	一 括
54F	目盛値 (kA)	5.0	8.0	5.0	9.0
	検出区間率	0.78	0.65	0.8	0.65
50F	目盛値 (kA)	2.5	2.5	3.0	3.0
	検出区間率	0.86	>1.0	0.79	>1.0

町変電所の54Fと50Fとの故障検出区間率を示す。同表で分割き電方式における54Fの目盛値は、一括き電方式の65%としている。一方、50Fの目盛値は1編成の電動車の数にほぼ比例させているので、同じ値でよいと考えられる。表2から、50Fの故障検出区間率は一括き電方式のほうが格段に良い。

4. 電力シミュレーション

〈4.1〉シミュレーションの手法 一般に、電気鉄道変電所の負荷容量とか、負荷点における電車線電圧を予測するとき、シミュレーションによる手法がとられている^{(12)~(14)}。

今回の電力シミュレーションプログラムは、既存の都市間鉄道のように種々の運用形態がとられ、車種が混在している場合のシミュレーションが可能のように、

- 入力データとして、ラン曲線シミュレーションに基づいた列車の位置および負荷電流の値を使う
- 列車の運用形態は特急、急行および普通の3種類まで、車種は電機子チョップ制御車、界磁チョップ制御車および抵抗制御車の3種類を入力できる
- 変電所の機能として、再生インバータの機能を模擬できる
- 車両編成数および乗車率は列車種別ごとに入力できる
- 変電所ごとに回路定数および線路定数を設定できる
- 回生失効率について、実情に近い値が得られるように電車の回生電流制限特性を入力できる特徴をもたせている。

本シミュレーションの手順は電車のラン曲線データを編集するまでの第一段階と、電力シミュレーションを実行する第二段階とに大別できる。図6および図7

図 6 ラン曲線データの編集流れ図
Fig. 6. Run curve data base flow chart.

図 8 簡略化した京都線の運転ダイヤグラム
Fig. 8. Simplified operation diagram for Kyoto line.

図 7 電力シミュレーション流れ図
Fig. 7. Electric power simulation flow chart.

に、第一段階および第二段階の流れ図を示す。

列車位置と負荷電流値とのラン曲線データは、運行形態および車種別に標準のラン曲線計算プログラムによって計算、編集し、これを磁気テープ MT に収納している。

通常、運転ダイヤグラムはある一定の周期ではほぼ同じパターンが繰返される。電力シミュレーションはこの点に着目して、厳密に同じパターンが繰返されるものと仮定し簡略化している。

〈4・2〉 京都線をモデルにしたシミュレーション

阪急電鉄京都線は輸送人員 85 万人/日、阪急梅田-

図 9 京都線の変電所および駅配置
Fig. 9. Locations of DC substations and stations along Kyoto line.

河原町間 48 km の住宅地帯を 39 分で結ぶ典型的な都市間鉄道で、特急、急行および普通の 3 種類の列車が運行されている。普通列車には、途中駅までの折返し列車および淡路から千里線、大阪市交通局堺筋線への分岐列車がある。更に、車種も抵抗制御車および界磁チョップパ制御車の 2 種類があり、かなり複雑な構成になっている。シミュレーションの対象として京都線を選んだ理由は、

(i) 全線の 90% が地表区間で、既に一括電方式で電されている

(ii) 全列車のなかで回生ブレーキ付界磁チョップパ制御車の占める比率が 30% で、阪急電鉄の路線のなかでは回生ブレーキ車の比率が高い

ことである。

図 8 はシミュレーションに使用するため、区間列車を除外して簡略化した京都線の運転ダイヤグラムである。京都線の変電所および駅配置は図 9 による。変電所および電系統の回路定数を表 3 に、電車の主要諸元を表 4 に示す。

シミュレーションは運転ダイヤグラムの繰返し周期

表 3 直流変電所およびき電線の回路定数

Table 3. Circuit parameters of DC substations and feeders.

項 目	変 電 所									
	中 津	淡 路	正 雀	茨 木	高 槻	大山崎	向日町	西 院	桂	京 都
定 格 容 量 (kW)	3,000	3,000×2	3,000×2	4,000	3,000×2	4,000	3,000×2	3,000×2		4,000
定 格 電 圧 (V)	1,587	1,617	1,617	1,617	1,605	1,613	1,606	1,606		1,617
定 格 電 流 (A)	2,000	2,000×2	2,000×2	2,667	2,000×2	2,667	2,000×2	2,000×2		2,667
電 圧 変 動 率 (%)	5.82	7.8	7.8	7.8	7.0	7.53	7.1	7.08		7.8
き 電 線 抵 抗 (Ω/km)	0.046	0.043	0.031	0.038	0.038	0.040	0.042	0.029	0.029	0.034 0.039
梅田からの距離 (km)	0.96	6.765	11.79	17.96	23.54	31.34	38.25	40.79	43.85	47.34

表 4 電車の主要諸元

Table 4. Particulars of electric trains.

項 目	諸 元	
	抵抗制御車	チョッパ車
形式および編成	6300系 4M4T	7300系 4M4T
軌 間 (mm)	1,435	
電気方式	直流 1,500V 架空電車線方式	
自 重 (t)	253.4	248.6
定 員 (人/車)	先頭車 140, 中間車 150	
加速度 (km/h/s)	2.4	2.4
減速度 (km/h/s)	2.8	2.8
定格速度 (km/h)	44.2	44.2
(1時間定格)	—	
最高速度 (km/h)	110	110
制御方式	電動カム軸式電空併用	
	発電ブレーキ	回生ブレーキ

を 15 分とし、2 秒間隔で計算している。また、特急の車種はすべて抵抗制御車、急行は抵抗制御車と界磁チョッパ制御車とで構成され、両者の比率は実情に合わせて 1:1 とした。シミュレーションの結果を表 5 にまとめた。

図 10 および図 11 は、き電線に流れる電流の一例である。図から、き電線に流れる電流は大きく変動している。

表 5 から、分割き電方式のき電線の電力損失に対して、一括き電方式の電力損失は 293 kW 少なく、その比率は 69% になっている。この値は変電所の総出力(平均値) 14,200 kW の 2.1% にすぎないが、年間の電力量に換算すると 10^6 kWh 台の節減が可能になった。変電所の出力の実測値は季節により変化がある。秋期(10 月ごろ)における変電所の総出力(平均値)は早朝のラッシュ時で 24,000 kW、昼間の閑散時で

図 10 淡路変電所の上り方向のき電線に流れる電流(分割き電方式)

Fig. 10. Feeder current toward up side from Awaji SS (without equalizer).

表 5 シミュレーションの結果
Table 5. Simulation results.

方 式	変電所出力 (kW)	負荷点電流 (平均値)		実効回生率 (%)	き電線損失 (kW)	負荷点電圧 (瞬時値)	
		力行 (A)	回生 (A)			最高 (V)	最低 (V)
分割き電	14,207	10,323	-1,672	15.4	931.6	1,175	1,774
一括き電	14,147	10,823	-1,710	15.8	688.3	1,228	1,775

図 11 淡路変電所の上り方向のき電線に流れる電流 (一括き電方式)

Fig. 11. Feeder current toward up side from Awaji SS (with equalizers).

17,000 kW になっている。冬期の値は秋期の10%増しである。また、シミュレーションとの差は途中駅までの折返し列車および大阪市交通局堺筋線への分岐列車があること、乗車率の違いなどによるものである。

き電線の電力損失は、電流の2乗に比例して増大する。従って、一括き電方式にしたことでき電線の電流は83%に減り、17%もの通電余力を生じている。

一方、負荷点の最高電圧と最低電圧とはき電方式による差が5%しかなかった。これは、ダイアグラムが過密なため、最悪の条件ではき電方式による差を生じないためと考えられる。

一般に、電源から流出する電流の値はき電方式とは無関係である。そこで、上下線のき電線に流れている電流(瞬時値)を i_a および i_b とすると、

$$i_a + i_b = i_c \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 i_c : 電源から流出する電流

である。き電線の電力損失 p_r は、

$$p_r = r(i_a^2 + i_b^2) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 r : 特定の区間における上りおよび下りのき電線の抵抗

である。 $p_r = 0$ の条件から、 p_r の最小値は、

$$i_a = i_b = i_c / 2 \dots\dots\dots (9)$$

のとき生じる。従って、き電線を均圧線で並列に接続し電流を平衡させると、電力損失は最低になる。

最後に、全電車の力行に要した電流(平均値)と回生電流(平均値)との比を実効回生率と定義すると、分割き電方式の実効回生率は15.4%、一括き電方式は15.8%で、一括き電方式の回生率がわずかに良くなっている。この差は、一括き電方式のほうがき電線の電圧降下が小さく、パンタ点電圧上昇による回生電流の絞り込み量が少ないこと、および上りと下りとの電車で回生エネルギーの授受が効果的に行われるためである。この差は回生ブレーキ付電車の比率が増すという大きくなる。

6. む す び

以上、一括き電方式はき電用の機器の数が半減し保守の工数が減るので、経済的で、しかも短絡保護を確実に行えることを述べた。次いで、阪急電鉄京都線を対象として、一括き電方式と分割き電方式についてシミュレーションを行った。その結果、一括き電方式で電すると、き電線の電力損失が減り、実効回生率を改善できることを明らかにした。

(昭和60年6月26日受付)

文 献

- (1) 日本電機工業会：「電力用半導体整流装置」，JEM 1156 (1961)
- (2) 直流き電回路保護方式専門委員会：「直流き電回路の故障電流と保護」，電学誌，83，21 (昭 42-11)
- (3) 吳，他：「電気運転設備の計画(その6)」，電気鉄道，18，31 (昭 39-6)
- (4) 神戸市交通局：神戸市営高速鉄道電力回生装置概要(昭52-1)
- (5) 浅野，他：「直流電気鉄道における上下線一括き電方式」，電気学会電気鉄道研資，RAT-83-7 (昭 58)
- (6) 上田，他：「コンピュータ・シミュレーションによるき電方式と変電所配置の検討」，近鉄技報，14，49 (昭 58)
- (7) 鈴木，他：「半導体遮断装置の現状と将来」，電学誌，102，810 (昭 57-9)
- (8) 須崎，他：「直流高速度固体遮断装置の試み使用」，電気学会電気鉄道研資，RAT-83-3 (昭 58)
- (9) 電気学会：電気鉄道ハンドブック，p. 357 (昭 43-1)
- (10) 津田電気計器：FE-12 形～FE-15 形 ΔI 形き電線故障選択装置取扱説明書
- (11) 吳，他：「電気運転設備の計画(その4)」，電気鉄道，18，43 (昭 39-4)
- (12) 立花，他：「直流電鉄のき電系統の計算」，日立評論，50，6 (昭 43-10)
- (13) 大野，他：「電鉄変電所負荷のシミュレーション」，三菱電機技報，44，282 (昭 45-2)
- (14) 水野，他：「高密度運転区間における電力回生率のシミュレーション」，電気学会電気鉄道研資，RAT-82-2 (昭 57-6)