

## 交流系統側電力潮流を考慮した直流き電回路計算手法

○ [電] 生出 珠之助 [電] 小西 武史 (公益財団法人鉄道総合技術研究所)

## DC feeding system calculation considering the AC power flows

○Tamanosuke Oide, Takeshi Konishi, (Railway Technical Research Institute)

Large-capacity energy storage devices or renewable power sources may be connected to transmission lines or distribution lines owned by railway operators. They change not only the power flows in the AC power systems, but also the rectifier output voltages. In the result, the acceleration performances and the regeneration energy of vehicles will change. In order to consider this influence, we have developed a coupled calculation method that combines the power flow calculation on the AC system side and the DC feeding system calculation.

キーワード: 直流き電回路, 電力潮流, 連成計算

Key Words: DC feeding system, power flow, coupled calculation

## 1. はじめに

鉄道事業者が所有する連絡送電線や高圧配電線に大容量の蓄電装置や再生可能エネルギーが連系されると、交流電力系統内の電力潮流が変動すると同時に直流電鉄用整流器の直流出力電圧も変動し、列車の力行性能や回生絞り込みが影響を受けることとなる。しかし、これまで鉄道総研で開発してきた直流運転電力シミュレータ「パワーダイヤグラム」<sup>1)</sup>は、直流き電回路のみを計算対象としていたため、交流系統側の電力潮流が直流き電回路内の電圧・電流分布に与える影響を考慮することができなかった。そこで、「パワーダイヤグラム」に交流系統側の電力潮流計算機能を付加し、直流き電回路の電圧・電流計算と連成させる手法を開発した。

## 2. 計算手法

## 2.1 交流系統の電力潮流計算

交流系統の電力潮流は、三相平衡の基本波のみを考慮し、一般的な潮流計算手法として知られるノード方程式(行列方程式)を用いた手法<sup>2)</sup>によって計算する。整流器負荷は、図1のように整流器用変圧器の漏れリアクタンスに相当する直列インダクタンスと、力率1の電力源 $p_i$ として表現する。ただし、 $p_i$ は別途直流き電回路計算によって得られる変電所 $i$ の整流器出力電力である。

## 2.2 交流系統側電力潮流と直流き電回路の連成計算

ある時刻における時刻ステップ内の連成計算のフローを

図2に示す。各時刻ステップの初回計算では、変電所 $i$  ( $i=1,2,\dots$ )の整流器用変圧器1次側電圧 $V_i$ とその公称電圧 $V_s$ の比 $\alpha_i = V_i/V_s$ をすべて1(全変電所とも整流器用変圧器1次側電圧が公称電圧に一致)と仮定し、ダイヤとノッチ操作、車両性能を考慮した直流き電回路の電圧・電流計算(以下、直流き電回路計算)を行う。次に、その結果として得られる各変電所の整流器出力電力 $p_1, p_2, \dots$ を用いて交流系統の電力潮流計算を行う。そして、潮流計算の結果から得られた各変電所の整流器用変圧器1次側電圧を $V_i(\text{new})$ として、前回値 $V_i(\text{before})$ (各時刻ステップの初回計算では $V_i(\text{before})=V_s$ )との差の絶対値が所与の値 $\epsilon(>0)$ 未満となっているかどうかを判定する。すべての $i$ について条件を満たせば現時刻ステップの計算を終了し、次の時刻ステップに進む。条件を満たさない $i$ が存在する場合には、 $\alpha_i$ の値を $V_i(\text{new})/V_s$ に更新して再度直流き電回路計算以降のフローを繰り返す。

以降では、交流系統側の影響を考慮せずに直流き電回路計算のみを実施する計算手法を従来手法、交流系統電力潮

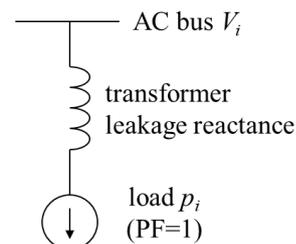


図1 交流系統側から見た整流器の等価回路表現

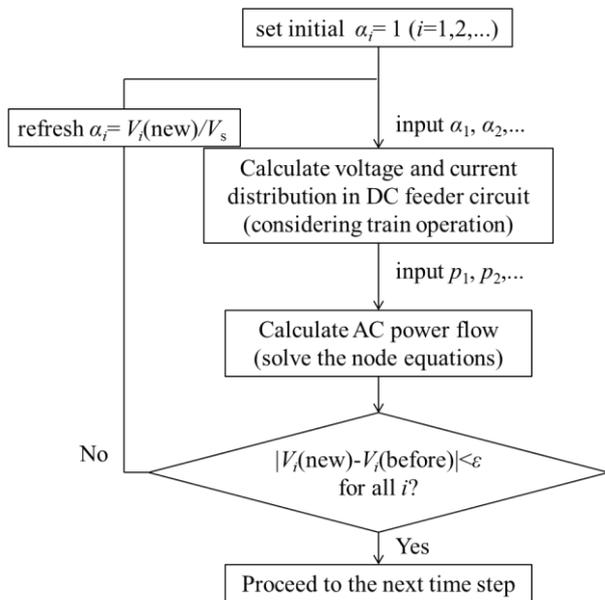


図2 時刻ステップ内の連成計算フロー

流計算と連成させる計算手法を開発手法と呼称して区別する。

2.3 整流器用変圧器1次側電圧の変動と整流器特性

複数の直流変電所 1,2,...が存在する路線において、変電所  $i$  の整流器の直流無負荷電圧は

$$\frac{V_i}{V_s} \cdot V_0 = \alpha_i V_0 \dots\dots\dots(1)$$

と表される。ただし、 $V_0$  は  $V_i=V_s$  のときの直流無負荷電圧である。整流器の VI 特性は  $\alpha_i$  に応じて図3のように上下に平行移動する。 $\alpha_i=1$  のときの特性が、整流器用変圧器1次側電圧が公称値に一致するときのVI特性を表している。

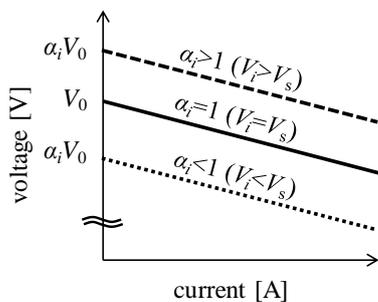


図3 整流器のVI特性変動

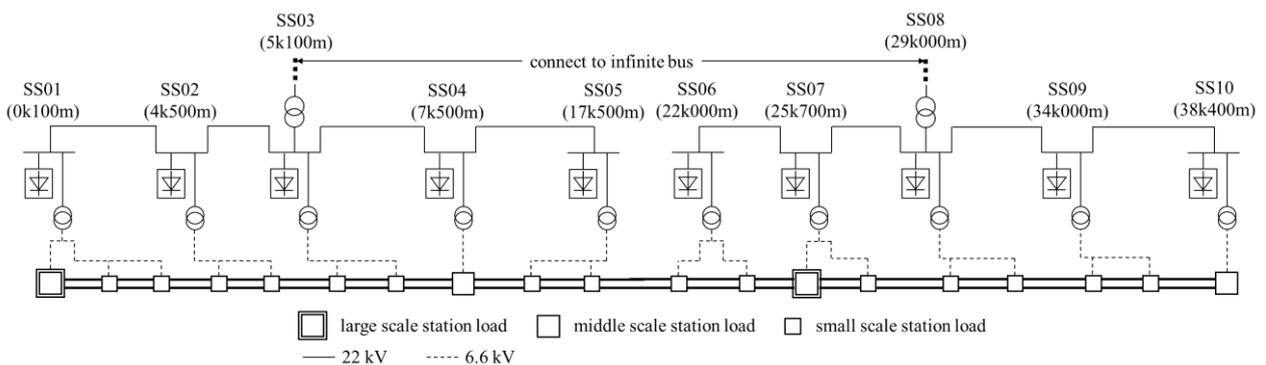


図4 モデル路線の電力設備概略

表1 モデル路線の諸元

路線規模	路線長 38.5km, 全線複線
駅数	19 駅 (大規模駅 2, 中規模駅 2, 小規模駅 15)
ダイヤ	全列車各駅停車 平行ダイヤ 早朝, 深夜 20 分間隔 日中 10 分間隔 朝夕ラッシュ 5 分間隔
車両	全列車 6 両編成, 乗車率 100%

表2 電力設備諸元

変電所数	10 ポスト
受電箇所	2 ポスト
電路	連絡送電線: 22kV 架空線路想定 高圧配電線: 6.6kV 架空線路想定 直流: シンプルカテナリ + Al510mm <sup>2</sup> × 2 条, 50N レール
整流器	1500 V, 3000 kW, 電圧変動率 6% (全変電所共通)

なお、ここでは並列 12 パルス整流器適用時における軽負荷時の電圧上昇<sup>34)</sup>の影響は考慮しないものとする。

3. モデル路線での試算

3.1 試算条件

モデル路線にて始発から終電(4時~翌1時)の試算を行い、従来手法と開発手法の計算結果を比較した。モデル路線の諸元を表1、電力設備諸元を表2、電力設備概略を図4にそれぞれ示す。変電ポストはSS01~SS10の10ポストであり、このうちSS03とSS08の2ポストが受電変電所となっている。受電変電所では、受電用変圧器によって受電電圧を22kVに降圧する。電力系統側は無限大母線と仮定する。SS01~SS05と、SS06~SS10の特高(22kV)母線はそれぞれ連絡送電線で接続されている。高配(6.6kV)系統には駅負荷が接続されている。駅負荷は大規模駅負荷、中規模駅負荷、小規模駅負荷の3種類である。試算に用いた駅負荷の模擬データを図5に示す。夕方から終列車までは照明を点灯すること、早朝と深夜は駅構内商業施設が営業しないことにより、19時付近が最大負荷となるような状況を模擬している。

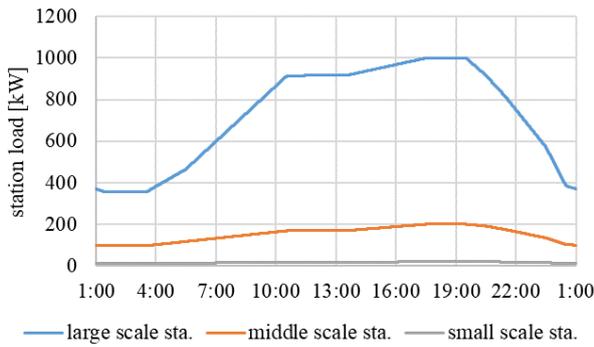


図5 駅負荷電力の模擬データ

3.2 試算結果

(1) 特高母線電圧（整流器用変圧器1次側電圧）

開発手法で計算した各変電所の特高母線電圧の平均値を図6に示す。受電変電所であるSS03とSS08の電圧平均値が高く、連絡送電線の末端に位置する変電所に向かって電圧平均値が低くなっている。

(2) 整流器特性

連絡送電線の末端に位置するSS01の整流器出力のVIプロットを図7に示す。従来手法の計算結果は整流器自体の特性のみで決まるVI特性を示しているのに対し、開発手法の計算結果は特高母線電圧の変動に伴う直流無負荷電圧の変動を反映してプロット点がばらついてきている。また、特に負荷電流が大きい領域において、従来手法の結果よりも電圧降下が大きくなっている。

受電変電所であるSS03の整流器出力のVIプロットを図8に示す。SS01の場合と比較して、従来手法と開発手法の結果の乖離が小さくなっている。これは、受電変電所の方が、連絡送電線の末端にある変電所よりも特高母線電圧の変動が小さいためである。

(3) 変電所供給電力量

1日の整流器出力電力量合計値の計算結果を図9に示す。開発手法の結果は、従来手法の結果よりも受電変電所であるSS03とSS08の供給電力量が大きく、連絡送電線の末端に位置するSS01, SS05, SS06, SS10の供給電力量が小さくなっている。このように、連絡送電線における電圧降下の影響で末端変電所の整流器出力電圧が下がり、列車負荷の分担が受電変電所寄りに偏るという現象が示される。

(4) 計算時間

開発手法では、交流電力潮流計算との連成計算を伴う影響で従来手法と比較して計算時間がかかる。筆者の試算環境 (Intel Core i7-6700 3.40GHz) では、従来手法の計算時間が279秒に対し、開発手法の計算時間は2788秒となり、約10倍の計算時間となった。

4. PV導入による列車運行への影響

4.1 試算条件

開発手法の具体的な活用の一例として、3章のモデル路線において、SS01の高圧配電母線にMW級のPVを接続し

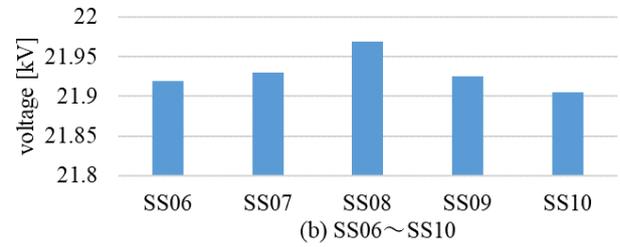
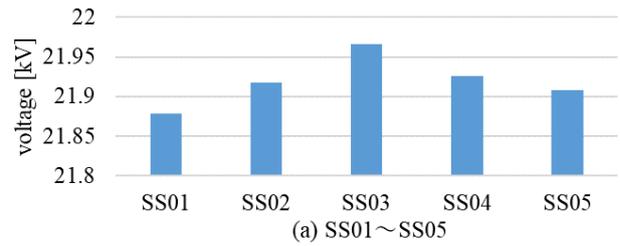


図6 特高母線電圧平均値

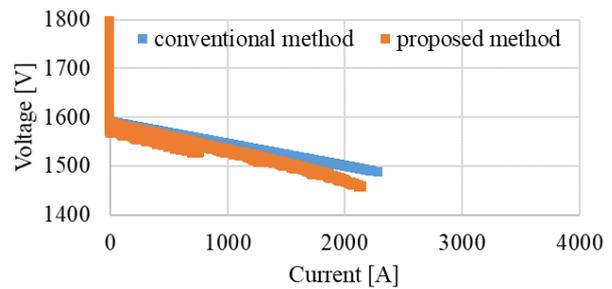


図7 整流器出力のVIプロット (SS01)

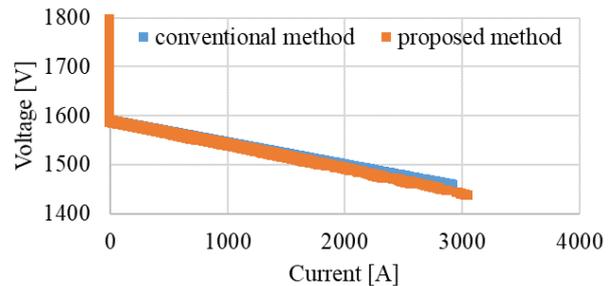


図8 整流器出力のVIプロット (SS03)

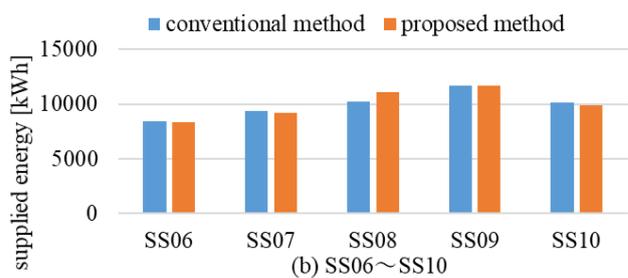
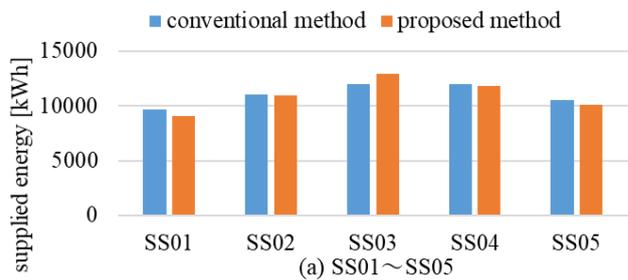


図9 整流器出力電力量

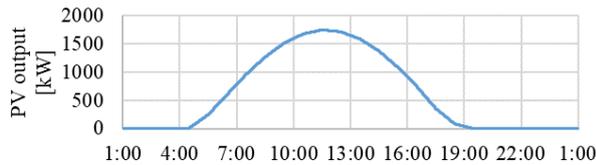


図10 PV出力電力の模擬データ

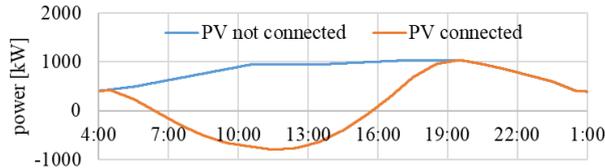


図11 高配用変圧器通過電力 (SS01)

た場合の試算を行う。PV出力の模擬データは、NEDO日射量データベース閲覧システム<sup>5)</sup>より取得した夏季の水平面日射量(岩手県紫波町, 7月18日平均年要素)にPV効率(0.2と仮定)とPV面積(10,000m<sup>2</sup>と仮定)を乗ずることで求める。得られたPV出力電力の模擬データを図10に示す。

#### 4.2 試算結果

##### (1) 高配負荷電力

SS01の高配用変圧器通過電力を図11に示す。SS01にPVを接続したケースでは、日中のPV出力がSS01の高配負荷電力を上回り、22kV系統側に逆潮流する。

##### (2) 特高母線電圧

SS01の特高母線電圧の1時間毎平均値を図12に示す。SS01にPVを接続したケースでは、日中のPV出力が大きい時間帯において、PVを接続しないケースよりも電圧平均値が2~5%高くなっている。

##### (3) 直流母線電圧

SS01の直流母線電圧の1時間毎平均値を図13に示す。SS01にPVを接続したケースでは、PVを接続しないケースよりも日中の電圧平均値が2~5V(0.2~0.3%)高くなっている。(2)の結果と比較すると、PV接続による電圧上昇の影響は直流側の方が小さいことが分かる。これは、整流器が動作していない期間において直流母線電圧が特高母線電圧の影響を受けないためである。

##### (4) 整流器負荷分担

1日分の整流器出力電力量1時間毎出力電力量を図14に示す。PVを接続したケースでは、SS01の電圧が上昇した影響でSS01の負荷分担が増加し、SS03の負荷分担が減少している。

##### (5) 活用されたPVのエネルギー量

PVを接続したケースでは、1日のPV発電量合計は15.0MWhとなった。このうち、受電の逆潮流電力量合計は0.43MWh(PV発電量合計の3%)であり、PV発電量の97%が電鉄負荷または高配負荷として活用された。

#### 5. まとめ

直流運転電力シミュレータ「パワーダイアグラム」に交流系統電力潮流計算機能を付加し、直流き電回路計算と連

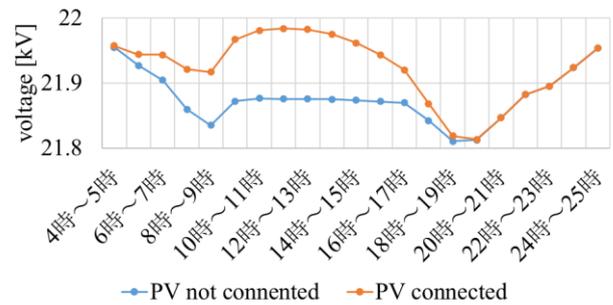


図12 特高母線電圧の1時間毎平均 (SS01)

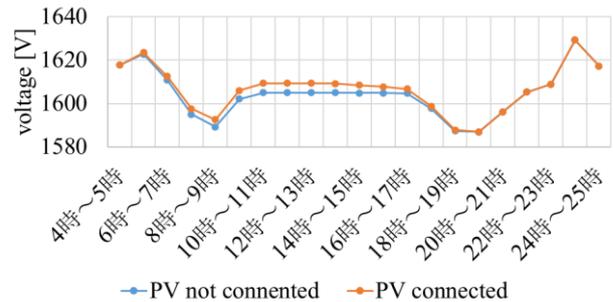


図13 直流母線電圧の1時間毎平均 (SS01)

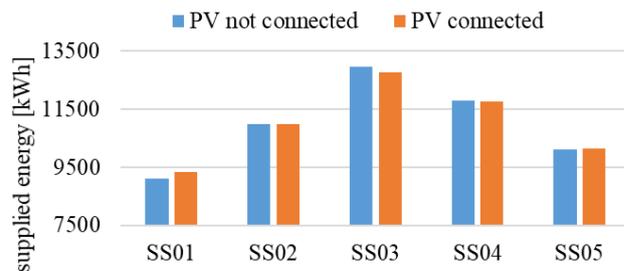


図14 整流器出力電力量 (SS01~SS05)

成させる手法を開発した。開発手法により、整流器用変圧器1次側電圧の変動に伴う整流器出力電圧の変動、負荷分担の変化が計算できることを確認した。また、開発手法を用いてPV導入時の試算を行い、日中の整流器出力電圧と負荷分担がPV出力の影響を受けることを確認した。

今後は、今回の開発手法をもとに、再生可能エネルギーや蓄電装置導入時の省エネ・低炭素化の効果、電圧変動や系統制御機器の導入効果等の定量的把握につなげる。

#### 参考文献

- 1) 森本大観, 吉井剣: 鉄道電力従事者向け直流運転電力シミュレータの機能拡張, J-Rail2015, 講演番号 2506.
- 2) 上之園親佐: 現代電力工学, pp.190-195, オーム社, 1980.
- 3) 日本鉄道電気技術協会: シリコン整流器, pp.36~42, 2009.
- 4) 吉井剣, 森本大観: 直流電鉄変電所用12パルスシリコン整流器の出力特性, H25電気学会全国大会, 5-104.
- 5) NEDO: METPV-11, <https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>