

# 高圧配電線路におけるフェランチ効果と逆潮流による電圧変動に関する研究

比江島 大輝<sup>a)</sup>・甲斐 貴大<sup>b)</sup>・Thin Thin Hlaing<sup>a)</sup>・林 則行<sup>c)</sup>

## Study on Voltage Fluctuation due to Ferranti Effect and Reverse Power Flow in High Voltage Distribution Line

Daiki HIEJIMA, Takahiro KAI, Thin Thin Hlaing, Noriyuki HAYASHI

### Abstract

In this paper, we investigated the relationship between static condenser installation and the characteristic of voltage variation due to Ferranti effect in high voltage distribution system incorporating with PV system. We investigated about the suppression of the Ferranti effect by detaching the static condenser capacitors. Focusing on the change in system voltage due to the Ferranti effect, we simulated the voltage change in the presence or absence of the static condenser capacitors. In simulation result, the highest voltage reduction occurred when the static condenser capacitor at the node number 24 was removed. However, the reduction of voltage rise is small as if only one static condenser is removed. Therefore, in order to control the system voltage by suppressing the Ferranti effect, it is necessary to release plenty of phase advance capacitors.

**Keywords:** Reverse Power Flow, Ferranti effect, Simulation

## 1. はじめに

近年、自然エネルギーへの関心の高まりから、分散型電源の導入が進んでいる。分散型電源で発電された余剰電力は配電系統に逆潮流することで売電できるが、近年配電系統の電圧上昇によって逆潮流が困難になり、余剰電力が売電できない問題が発生している<sup>1)</sup>。この系統電圧の上昇には逆潮流による電圧上昇やフェランチ効果による電圧上昇、大容量で不安定な出力などが上げられる。今回は、逆潮流による電圧上昇とフェランチ効果による電圧上昇の2つに注目して検討を行った。配電系統に逆潮流を行った場合、変電所から流れ込む電力と逆潮流の影響により接続点での電圧が上昇する。また、受電家が設置している進相コンデンサ(SC)が系統電圧を上昇させる現象が挙げられ、この現象はフェランチ効果と呼ばれている<sup>2)</sup>。今後も分散型電源の導入増加が見込まれる中で、系統電圧の適正維持は非常に重要な課題となっている。

本研究では、PVシステムが組みこまれた高圧配電系統を対象として、線路上における進相コンデンサの容量や設置場所とフェランチ効果による電圧上昇特性との関係を調査する。しかし、実線路における実態調査のみでは十分な検討ができないため、シミュレーションによる解析結果

に基づき、逆潮流やフェランチ効果による電圧上昇について検討する。

## 2. 解析及び分析

### 2.1 解析方法と項目

#### 2.1.1 解析方法

本解析では、潮流計算の代表的手法として電力回路網の接点アドミタンス行列をもとにしたNewton-Raphson法と閉路インピーダンス行列をもとにしたプログラムをMicrosoft Visual C++で作成した<sup>4)</sup>。今回潮流計算を行った系統図を図1に示す。図1は配電系統をモデル化した仮想的な系統である。20 MVA容量の変圧器から給電される6.6 kV配電系統で、20軒の需要家と1つのPVから構成されている。総契約電力は2.44 MW、総SC容量は1.02 MVARであり、PVは変電所から一番遠い地点に設置した。

図1で、線路の支点にある丸記号はノード、番号付けされている四角枠は需要家、そして長さは変電所からノードや需要家への距離を示しており、変電所からの距離を基準に4つにエリア分けを行った。また、ノード間の線路はアルミ架空絶縁線路、銅ケーブル、及びアルミケーブルを想定し、 $R=0.0309 \Omega/\text{km} \sim 1.1500 \Omega/\text{km}$ 、 $X=0.1007 \Omega/\text{km} \sim 0.4463 \Omega/\text{km}$ とした。

a)電気電子工学専攻大学院生

b)電気電子工学科学部生

c)工学教育研究科教授

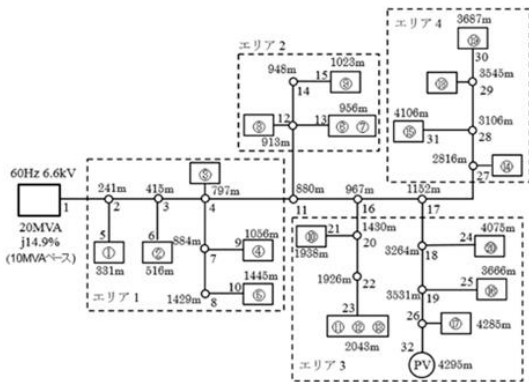


図1 6.6kV 配電系統図

2.1.2 解析項目

本解析では、次の項目について検討を行った。

- ① 逆潮流による電圧上昇
- ② SC 切り離しによるフェランチ効果の抑制

本稿では、逆潮流とフェランチ効果による系統電圧の変化に注目し、負荷の条件を変化させた場合における系統電圧の変化を検討した。

2.2 電圧の上限值

電圧の品質レベルについては、電気事業法第 26 条施行規則第 44 条に、「標準電圧 100V の場合、101V±6V を超えない値、標準電圧 200V の場合、202V±20V を超えない値」を維持するよう規定されている。また、それ以外の標準電圧の最大電圧は、使用電圧に表 1 に規定する係数を乗じた電圧であり、6.6 kV 配電系統の場合は最大電圧が 6.9 kV (単位法で 1.045 pu) である。

表 1 最大電圧の求め方に使用する係数<sup>6)</sup>

使用電圧の区分	係数
1,000V 以下	1.15
1,000V を超え 500,000V 未満	1.15/1.1
500,000V	1.05、1.1 又は 1.2
1,000,000V	1.1

3. 重負荷時シミュレーション解析結果

3.1 シミュレーション内容

重負荷時の解析には需要家の全ての負荷が 100%使用されていると仮定する。PV システムの発電量を総契約電力の 0%から 100%まで 20%ずつ変化させた場合のシミュレーション解析を行い、各ノードの系統電圧の変化に注目することで逆潮流による電圧上昇について検討を行う。その後、SC を開放させた場合の解析を行い、どのような SC を切り離すことで電圧上昇を抑制できるか検討を行う。

3.2 逆潮流による電圧上昇

図 2 に PV システムが総契約電力の 20%の発電を行った場合のシミュレーション解析結果を示す。図 2 より、逆潮流によって各ノードの系統電圧が上昇していることが確認できる。また、ノード 18、19、24、25、26、32 においてはその他のノードと比較して系統電圧が大きく上昇し、その中でも PV システム設置ノードにおいて最も系統電圧が上昇した。これは、PV システム設置場所に近いため、逆潮流による影響が大きいことが考えられる。

表 2 に PV システムの発電量が 0%から 100%までの PV システム設置ノードにおける電圧上昇について示す。表 2 より、PV システムの発電量が増加するに伴い系統電圧が上昇し、最大で 1.162 pu まで系統電圧が上昇した。また、6.6 kV 配電系統の最大電圧は 1.045 pu である。そのため、PV システムの発電量が 40%から 100%においては系統電圧の上限值を超過していることから、逆潮流を行うことができずに電力の売電ができないことが考えられる。

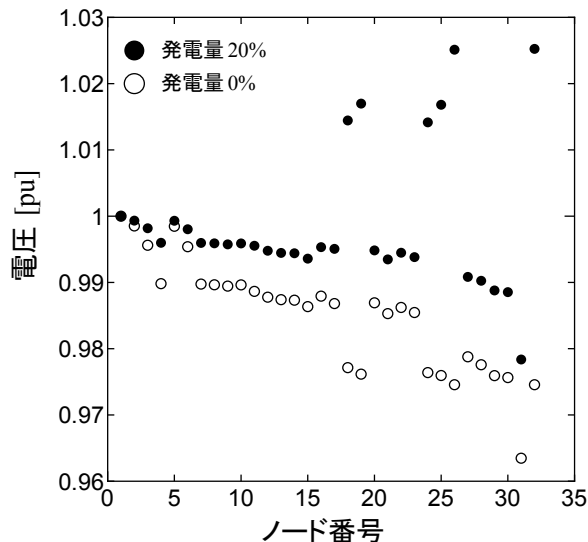


図 2 逆潮流による電圧上昇

表 2 PV システム設置ノードにおける電圧上昇

PV 発電量 [%]	電圧 [pu]	電圧上昇率 [%]
0	0.975	
20	1.025	5.07
40	1.063	8.88
60	1.099	12.39
80	1.131	15.65
100	1.162	18.69

3.3 SC 開放による電圧制御

前節において、逆潮流により系統電圧が大きく上昇することが確認できた。そのため、SC 切り離しによるフェランチ効果の抑制が必要である。

本節では、PV システムの発電量が 20%と 100%の場合において、各エリアの SC 開放によるフェランチ効果の抑制を行った。図 3 に PV システムが 20%の発電を行った場合、図 4 に PV システムが 100%の発電を行った場合のエリア 1 の SC を開放した解析結果を示す。図 3、図 4 より全ての SC を開放することで系統電圧が大きく低減することが確認できる。逆潮流によって一番系統電圧が上昇した PV システム設置ノードでは、エリア 1 の SC を開放することで PV システムの発電量が 20%のとき 0.065%、発電量が 100%のとき 0.061%の系統電圧が低減した。また、全ての SC を開放した場合は、発電量が 20%のとき 0.850%、発電量が 100%のとき 0.911%の系統電圧が低減した。

表 3 に各エリアの SC を開放した場合の PV システム設置ノードでの電圧低減率を示す。各エリアの SC を開放した場合、PV システムが設置されているエリア 3 の SC を開放することで最も系統電圧が低減した。また、発電量が 100%のとき SC 開放による電圧低減率が大きいことから、PV システムの発電量が増加することでフェランチ効果による系統電圧の上昇も増加することが考えられる。

次に、最も電圧上昇の低減が大きかったエリア 3 の各 SC を開放した場合のシミュレーション解析を行った。図 5 に PV システムの発電量が 20%の場合、図 6 に PV システムの発電量が 100%の場合のエリア 3 内のノード 21 の SC 開放時の解析結果を示す。ノード 21 の SC を開放することで PV システム設置ノードにおいて発電量が 20%の場合 0.033%、発電量が 100 の場合 0.031%の電圧が低減した。その他のノードの SC を開放した場合の解析結果を表 4 に示す。各ノードを比較すると、ノード 23 の SC 容量が一番大きく、ノード 26 が PV システムに一番近い。しかし、SC 開放による電圧上昇の低減はノード 24 の SC 開放時に最大となった。このことから、フェランチ効果の抑制には PV システムに近く、その中でも容量の SC を開放することが有効であると考えられる。

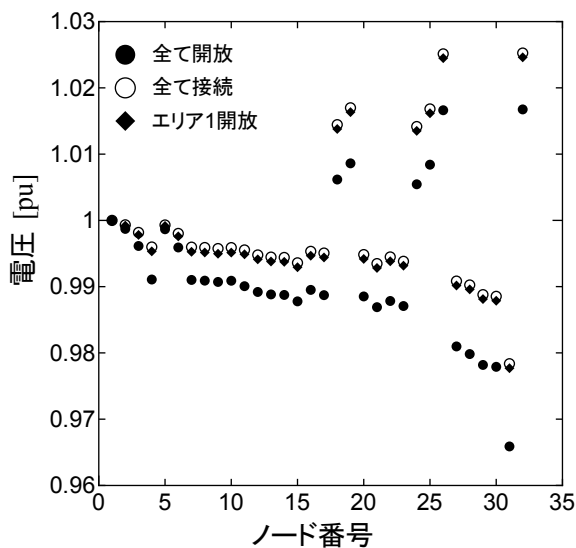


図 3 発電量が 20%の場合の電圧変化

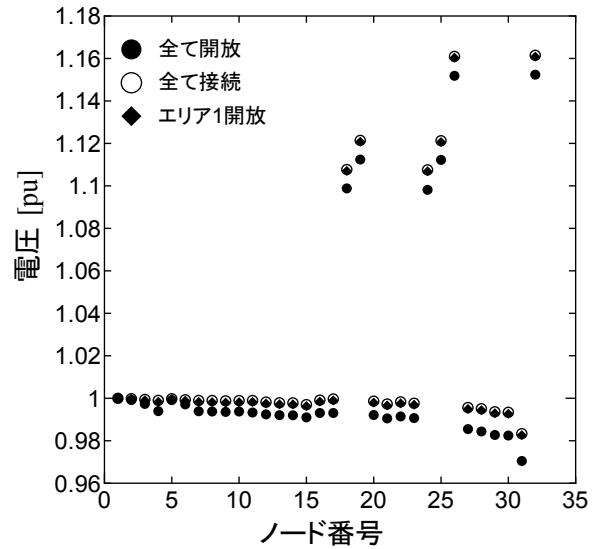


図 4 発電量が 100%の場合の電圧変化

表 3 各エリアの SC 開放による電圧変化

SC 開放 エリア	契約電力 [kW]	SC 容量 [kVAR]	電圧低減率 [%]	
			20%	100%
全て接続	2444	1016		
エリア 1	432	200	0.065	0.061
エリア 2	861	336	0.195	0.185
エリア 3	444	221	0.389	0.472
エリア 4	707	259	0.204	0.194
全て開放	2444	1016	0.850	0.911

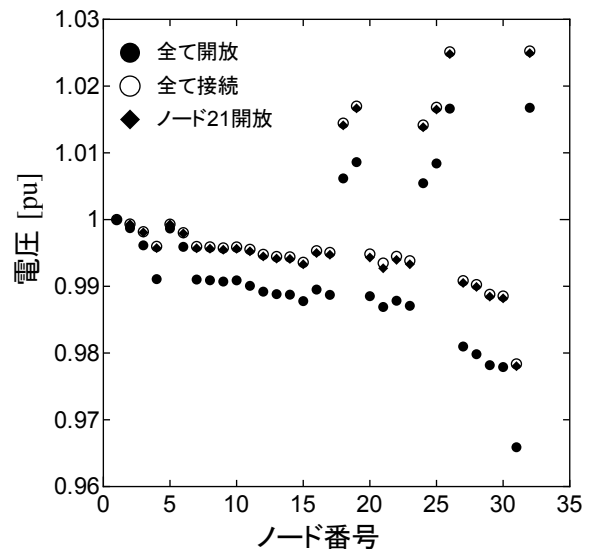


図 5 発電量が 20%の場合の電圧変化

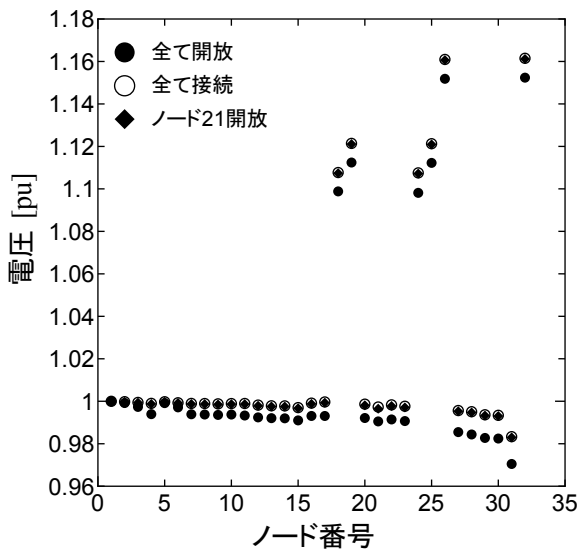


図6 発電量が100%の場合の電圧変化

表4 各ノードのSC開放による電圧変化

開放ノード	SC容量 [kVAR]	距離 [m]	電圧低減率 [%]	
			20%	100%
ノード21	50	4299	0.033	0.031
ノード23	81	4404	0.053	0.050
ノード24	50	1842	0.152	0.191
ノード25	20	899	0.067	0.085
ノード26	20	10	0.084	0.113

#### 4. 軽負荷時シミュレーション解析結果

##### 4.1 シミュレーション内容

軽負荷時の解析には需要家の全ての負荷が5%使用されていると仮定する。重負荷時と同様に、PVシステムの発電量を総契約電力の0%から100%まで20%ずつ変化させた場合のシミュレーション解析を行い、各ノードの系統電圧の変化に注目することでPVシステムの逆潮流による電圧上昇について検討を行う。その後、SCを開放させた場合の解析を行うことでどのようなSCを切り離すことで系統電圧の上昇が抑制されるか検討を行う。

##### 4.2 逆潮流による電圧上昇

図7にPVシステムが総契約電力の20%の発電を行った場合のシミュレーション解析結果を示す。図7より、重負荷時と比較して、全体的に電圧が上昇していることが確認できる。これは、軽負荷時では電力を総契約電力の5%しか使用していないことと、SCを接続したままにすることで進み電流が発生して、フェランチ効果により電圧が上昇

したためであると考えられる。また、重負荷時と同様に、逆潮流によって各ノードの系統電圧が上昇していることが確認できる。その中でもノード18、19、24、25、26、32においてはその他のノードと比較して系統電圧が大きく上昇し、PVシステム設置ノードにおいて最も系統電圧が上昇した。このことから、軽負荷時の場合でも、逆潮流による系統電圧の上昇はPVシステム設置付近に与える影響が大きいことが考えられる。

表5にPVシステムの発電量が0%から100%までのPVシステム設置ノードにおける電圧上昇について示す。表5より、PVシステムの発電量が増加するに伴い系統電圧が上昇し、最大で1.180 puまで系統電圧が上昇した。また、逆潮流を行った全ての場合で上限値である1.045 puを超過していることから、SC切り離しによるフェランチ効果の抑制が必要であると考えられる。

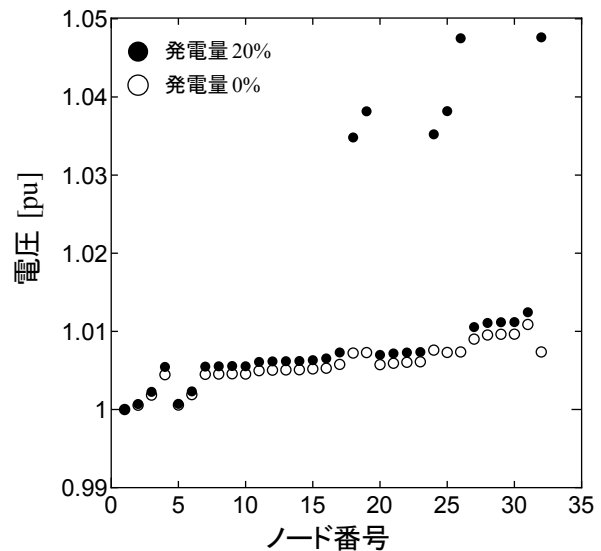


図7 逆潮流による電圧上昇

表5 PVシステム設置ノードにおける電圧変化

PV 発電量 [%]	電圧 [pu]	電圧上昇率 [%]
0	1.007	/
20	1.048	
40	1.085	7.71
60	1.119	11.12
80	1.150	14.29
100	1.180	17.26

##### 4.3 SC開放による電圧制御

前節において、逆潮流を行った全ての場合で大きく電圧が上昇し、上限値を超過した。そのため、SC切り離しによるフェランチ効果の抑制が必要である。

本節では、重負荷時と同様に、各エリアのSC開放によるフェランチ効果の抑制を行った。図8にPVシステムが

20%の発電を行った場合、図9にPVシステムが100%の発電を行った場合のエリア1のSCを開放した解析結果を示す。全てのSCを開放することで系統電圧が大きく低減した。逆潮流によって最も系統電圧が上昇したPVシステム設置ノードでは、エリア1のSCを開放すると発電量が20%の場合は0.064%、発電量が100%の場合は0.061%の系統電圧が低減した。また、全てのSCを開放すると発電量が20%の場合は0.863%、発電量が100%の場合は0.928%の系統電圧が低減した。

表6に各エリアのSCを開放した場合のPVシステム設置ノードでの電圧と電圧低減率を示す。各エリアのSCを開放した場合、PVシステムが設置されているエリア3のSCを開放することで最も系統電圧が低減し、PVシステムの発電量が20%の場合においては系統電圧を適正範囲内に収めることができた。しかし、PVシステムの発電量が100%の場合、逆潮流によって大きく電圧が上昇していることから、全てのSCを開放した場合でも系統電圧を適正範囲内に収めることができなかった。

次に、最も電圧上昇の低減が大きかったエリア3の各SCを開放した場合のシミュレーション解析を行った。図10にPVシステムの発電量が20%の場合、図11にPVシステムの発電量が100%の場合のエリア3内のノード21のSC開放時の解析結果を示す。ノード21のSCを開放することでPVシステム設置ノードにおいて発電量が20%の場合0.033%、発電量が100の場合0.031%の電圧が低減した。その他のノードのSCを開放した場合の解析結果を表7に示す。重負荷時と同様に、ノード24のSC開放時に最も電圧低減率が大きいことから、フェランチ効果の抑制にはPVシステムに近く、その中でも容量のSCを開放することが有効であると考えられる。また、1つのSC開放では電圧低減率が小さいため、フェランチ効果の抑制による電圧制御には複数のSCを開放する必要がある。

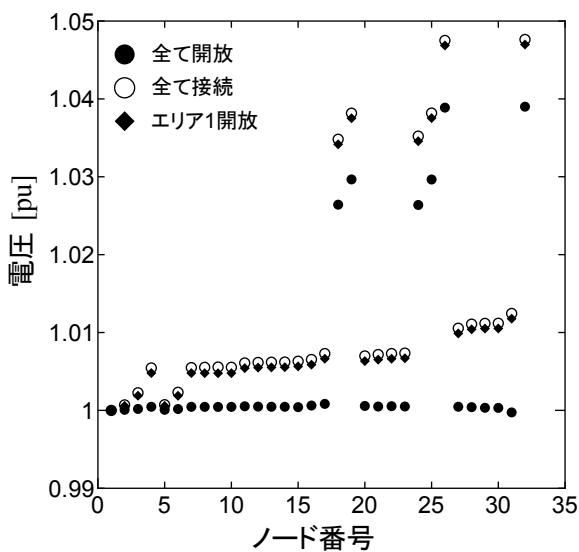


図8 発電量が20%の場合の電圧変化

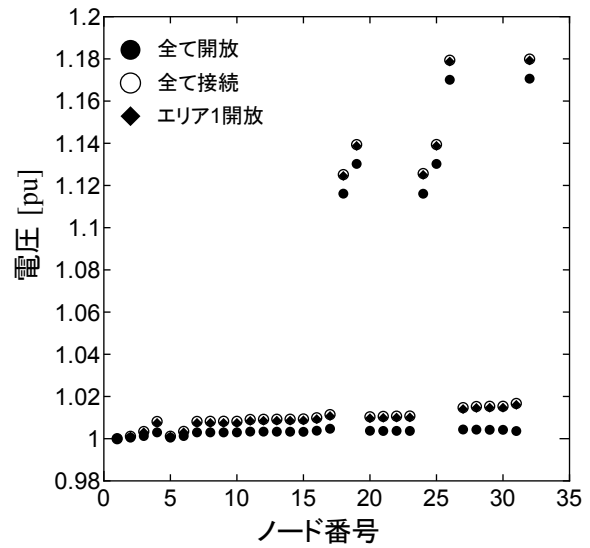


図9 発電量が100%の場合の電圧変化

表6 各エリアのSC開放による電圧変化

SC開放 エリア	契約電力 [kW]	SC容量 [kVAR]	電圧低減率 [%]	
			20%	100%
全て接続	2444	1016		
エリア1	432	200	0.064	0.061
エリア2	861	336	0.195	0.187
エリア3	444	221	0.397	0.482
エリア4	707	259	0.209	0.199
全て開放	2444	1016	0.863	0.928

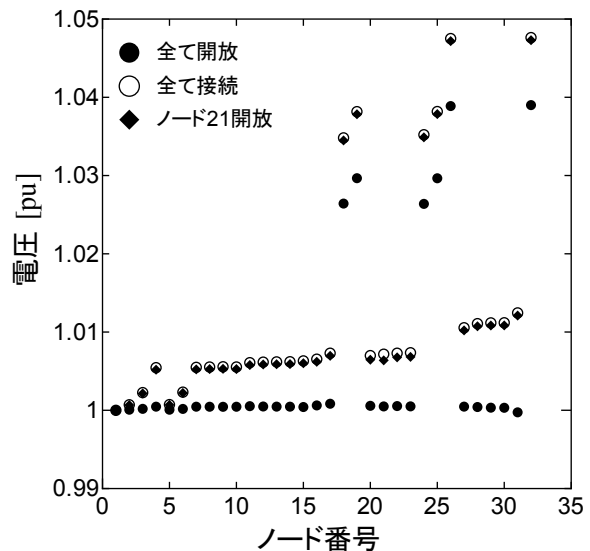


図10 発電量が20%の場合の電圧変化

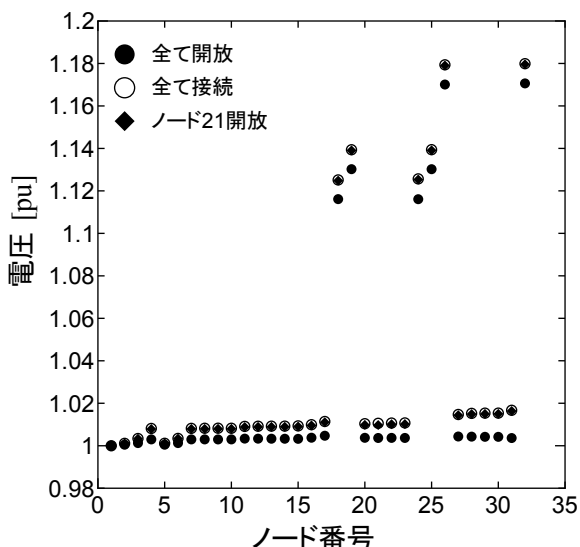


図 11 発電量が 100% の場合の電圧変化

表 7 各エリアの SC 開放による電圧変化

開放ノード	SC 容量 [kVAR]	距離 [m]	電圧低減率 [%]	
			20%	100%
ノード 21	50	4299	0.033	0.031
ノード 23	81	4404	0.053	0.051
ノード 24	50	1842	0.156	0.195
ノード 25	20	899	0.068	0.087
ノード 26	20	10	0.086	0.116

5. 結論

本研究では、PV システムが組みこまれた高圧配電系統を対象として、線路上における SC の容量や設置場所とフェランチ効果による電圧上昇特性との関係を調査した。実線路上における実態調査のみでは十分な検討ができないため、シミュレーションによる解析結果に基づき、逆潮流やフェランチ効果による電圧上昇について検討した。

重負荷時においては、逆潮流により全てのノードで系統電圧が上昇し、その中でも PV システム設置付近のノードで系統電圧が大きく上昇した。また、PV システムの発電量が 40% から 100% の場合においては、系統電圧が上限値である 1.045 pu を超過した。そのため、SC 切り離しによるフェランチ効果の抑制を行った。その結果、エリア 3 の SC 開放時に最も系統電圧の上昇が低減した。また、エリア 3 内の各ノードの SC を開放した場合、ノード 24 の SC 開放時に電圧上昇が低減したことから、フェランチ効果の抑制には PV システムに近く、その中でも SC 容量が大きい SC を開放することが有効であると分かった。

次に、軽負荷時におけるシミュレーション解析では、重

負荷時と比較して全体的に系統電圧が上昇した。これは、需要家の電力消費が小さいこととフェランチ効果によって系統電圧が上昇したためであると考えられる。また、逆潮流を行った全ての場合において系統電圧が上限値である 1.045 pu を超過した。そのため、重負荷時と同様に、SC 開放によるフェランチ効果の抑制を行った。その結果、PV システムの発電量が 20% の場合においてはエリア 3 の SC を開放することで、系統電圧を適正範囲内に収めることができた。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部: 新エネルギーの大量導入に伴う影響とその対策について, 平成 20 年 9 月.
- 2) 木村 卓郎: 九州地区の高圧需要家における自動力率調査装置実態調査, 電気設備学会全国大会, pp.365-368, 2014 年.
- 3) 中島昇: ”北部九州の高圧需要家における進相コンデンサ実態調査”, 電気設備学会全国大会, pp.361-364, 2014 年.
- 4) 五反田 一希: 太陽光発電の導入を想定した高圧配電線路の力率改善用コンデンサと線路電圧に関する研究, 平成 27 年.
- 5) 小池東一郎: 送配電工学, 養賢堂, 1967 年.
- 6) 原子力安全・保安院 電力安全課, ”電気設備の技術基準の解釈”, 平成 24 年 6 月.