

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 24 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656187

研究課題名(和文) スマートグリッド構想における配電系統の線路損失最小化制御

研究課題名(英文) Control of Line Loss Minimization on Power Distribution System for Smart Grids

研究代表者

竹下 隆晴 (Takeshita, Takaharu)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70171634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：電柱などを用いて電力を送っている電力配電系統における線路損失低減のために、電力を受電する工場などでは、自動力率調整装置を導入して無効電力を零に、すなわち受電力率を1に調整している。しかしながら、自動力率調整装置が導入されている需要家の割合は50%以下であり、十分な線路損失低減ができていない。本研究では、スマートグリッド構想時代に適した新たな配電系統の制御法として、系統内各所の線路電流、電圧情報を用い、既存自動力率調整装置を有効利用して、配電系統全体の無効電流による線路損失を現状の1/10にする提案をしている。モデル実験で線路損失最小化の検証を行った。

研究成果の概要(英文)：For reducing the line loss in power distribution system, the consumers install the automatic power factor regulator. However, the ratio for installing the automatic power factor regulator is less than 50%, and the line loss reduction is not realized. In this research, novel control of the distribution system based on the smart grid is proposed. In the proposed control, the existing automatic power factor regulators are controlled by using the node voltages and line currents in the distribution system, and the line loss caused by the reactive current can be reduced to 10%. The effectiveness of proposed control is verified by the experiments using the laboratory prototype.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電力工学 パワーエレクトロニクス 低消費電力・高エネルギー密度 省エネルギー 電気機器工学

1. 研究開始当初の背景

日本の消費エネルギーの4割以上が電気エネルギーであり、その送電損失の低減が、地球環境問題からも重要な課題になっている。しかしながら、現状の日本の配電システムは、放射状システムによる電圧管理をしており、損失低減までの十分な対応をしていない。このような状況の中で、CO2抑制と共に全体の電力消費量を削減するスマートグリッド構想が世界中で注目されている。スマートグリッドにおいては、情報ネットワークが整備され、系統各所の電圧電流情報を用いることで、配電システムのさまざまな高度な制御が期待される。

申請者は、ループコントローラを用いた線路損失低減と電圧制御に関する研究にて、ループ配電システムにおける循環電流を零にすることで、線路損失最小化を実現している。線路損失の要因を調べていく中で、循環電流による損失より無効電流が発生する線路損失が大きいことに気づき、スマートグリッド構想における配電システム各所の電圧電流情報を新たに用い、無効電流低減法を確立し、無効電流による線路損失を現状の1/10に低減する。

2. 研究の目的

電力配電システムの線路損失低減のために、電力需要家の力率改善コンデンサを用いた自動力率調整装置を導入して無効電力を零に、すなわち受電力率を1に調整している。しかしながら、自動力率調整装置が導入されている需要家の割合は50%以下であり、十分な線路損失低減ができていない。本研究では、スマートグリッド構想時代に適した新たな配電システムの制御法の1つとして、線路損失最小化を実現する。配電システム内各所の線路電流、電圧情報を用い、既存設備を有効利用して、配電システムの無効電流による線路損失を現状の1/10にする。本研究は日本発のスマートグリッド構想の特徴となり、地球温暖化防止に貢献すると共に、さらにスマートグリッド構想における配電システムの電圧制御、系統安定化などの新たな学術分野への発展に期待できる。

3. 研究の方法

図1は配電システムモデルにおける無効電流の流れで線路損失を1/10にできる斬新なアイデアの概念を示している。図(a)従来制御では、ノード1, 3, 5の需要家には自動力率調整装置が導入されており、無効電流は流れていない。しかしながら、ノード2, 4の需要家のそれぞれの無効電流 $2I_0$ が配電用変電所から供給され、このときの各線路の無効電流の大きさを矢印の太さで示している。どの線路も同一の抵抗 R とすれば、無効電流による全線路損失 $P_{loss}=40RI_0^2$ になる。これに対して、図(b)提案法では系統全体の全線路損失が最小になるように自動力率調整装置を制御する方式である。需要家の自動力率調整装置から需要家の無効電流を供給すれば、全線路損失を $P_{loss}=4RI_0^2$ にでき、従来方式に比較して無効電流による線路損失を1/10にできる。このように1/10程度に損失を低減できるので、実質的に全需要家に自動力率調整装置を導入したのと同程度まで損失を低減できる

具体的な研究方法として3項目を以下に示す。

(1) 複数補償器による複数需要家の無効電力補償法と線路損失最小化

本提案は、スマートグリッド構想により、配電システム各所の電流情報が得られる点で時機を得た提案であり、図1(b)に示す提案法の複数補償器による複数需要家補償の一般形としての損失最小化制御理論を導出する。

(2) 補償容量限界および非連続補償量による無効電力補償と線路損失低減効果

自動力率調整装置には無効電流補償量の容量限界があり、また、需要家に設置された進相コンデンサではオン/オフ制御となるので補償量が非連続になる。このように実用面に適応するために、さまざまな制約のもとでの一般形としての損失最小化制御理論を導出する。

(3) 無効電流を低減するための補償装置の配置と線路損失低減効果

無効電流を効果的に抑制し、線路損失を低減するための自動力率調整装置や進相コンデンサの設置場所を明らかにする。さらに、線路損失を最も効率よく低減するための配電システムの構成を明確にする。

4. 研究成果

(1) 複数補償器による複数需要家の無効電力補償法と線路損失最小化

図2は、配電システムの解析モデルで、送り出し電圧 \dot{V}_s から直列に線路1~4(線路抵抗 $R_1 \sim R_4$, 線路インダクタンス $L_1 \sim L_4$ で配線されている。ノード2, 3に負荷(load)が接続され、ノード1, 4のSVG(無効電力補償装置)の補償電流 \dot{I}_{c1q} , \dot{I}_{c4q} により、配電システムの無効電流を補償して、線路損失を最小化する。

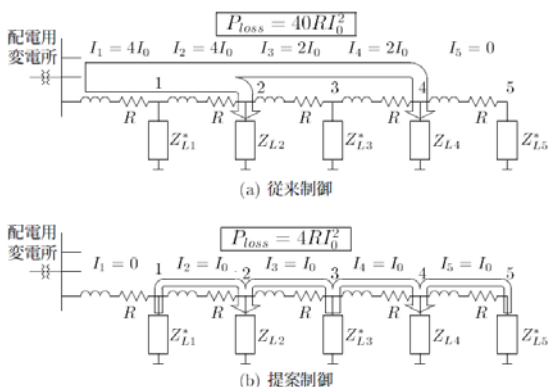


図1 配電システムモデルと無効電流フロー

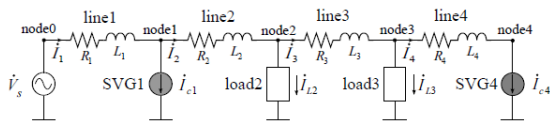


図2 配電システムモデル

図3は、無効電流を補償して、線路損失最小化をしたときの無効電流の変化を示している。負荷2, 3の無効電流 I_{L2q} , I_{L3q} を、次式の SVG 補償電流 I_{c1q} , I_{c4q} としたときに線路損失最小化ができる。

$$I_{c1q} = -\frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} I_{L2q} - \frac{R_4}{R_2 + R_3 + R_4} I_{L3q}$$

$$I_{c4q} = -\frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4} I_{L2q} - \frac{R_2 + R_3}{R_2 + R_3 + R_4} I_{L3q}$$

上式は、負荷2の無効電流 I_{L2q} は、SVG1, 4により負荷2からそれぞれのSVGまでの抵抗比で補償することで、損失最小化を実現できる。

図4は、図2の配電システムモデルに対応した三相実験システム構成である。図5は、図4の実験システムを用いて、提案する無効電力補償を実施した結果である。理論的には、補償により15.2Wから3.31Wに損失が低減され、実験でも17.6Wから3.48Wに低減され、同様の損失低減結果が得られた。

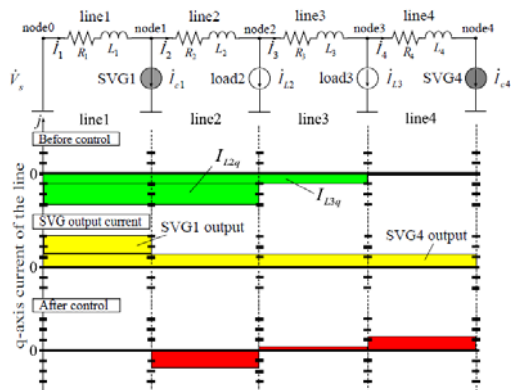


図3 無効電流の補償

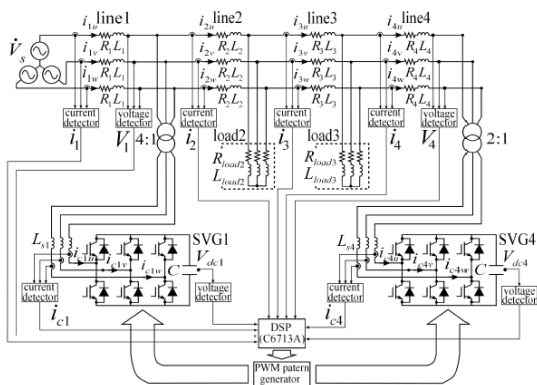


図4 三相実験システム構成

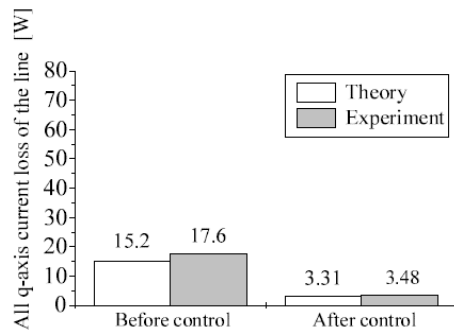


図5 無効電力補償による損失低減

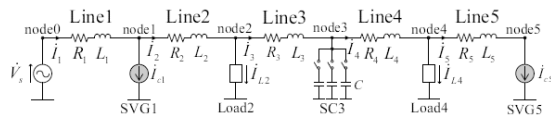


図6 進相コンデンサを持つ配電システム

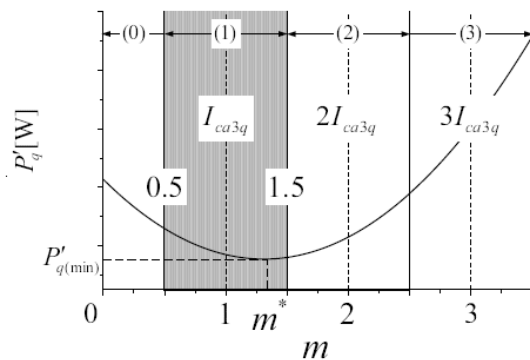


図7 SCの接続個数 m と線路損失

(2) 補償容量限界および非連続補償量による無効電力補償と線路損失低減効果

図6は、ノード3に3並列の同容量の進相コンデンサ (SC) を持つ配電システムモデルである。この場合、SVG1, SVG5とSC3が協調して線路損失を最小化する方法を検討する。SCはコンデンサの接続個数 m ($=1, 2, 3$) によって、無効電力の補償量が離散的な値をとり、損失を最小化する接続個数 m を導出する。

図7はSCの接続個数 m を連続量とした場合の無効電力による線路損失 P'_q の変化を示している。すなわち、SCを連続量として扱い、損失が最小になる値 $m=1.3$ であり、最も近い整数値 $m=1$ とすることで、損失最小化を実現できる。

図8は、図6のSCを持つ配電システムモデルに対応した三相実験システム構成である。図9は、無効電流成分による線路損失の理論値と、実験結果を用いて無効電流分の損失のみを計算した値で、制御前、2台のSVG制御、2台のSVGとSC制御の結果を示している。制御前、2台のSVG制御、2台のSVGとSC制御により、理論値では、それぞれ52.8W, 4.6W, 3.1Wと損失低減がされ、実験をもとにした計算値においても、同様にそれぞれ51.0W, 5.8W,

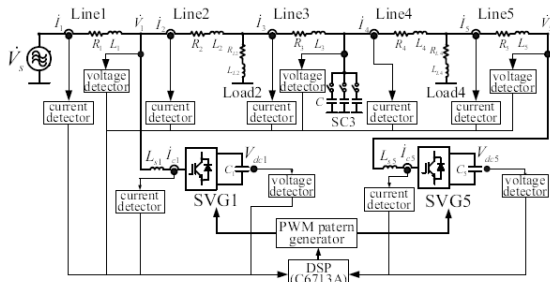


図8 進相コンデンサを実験システム

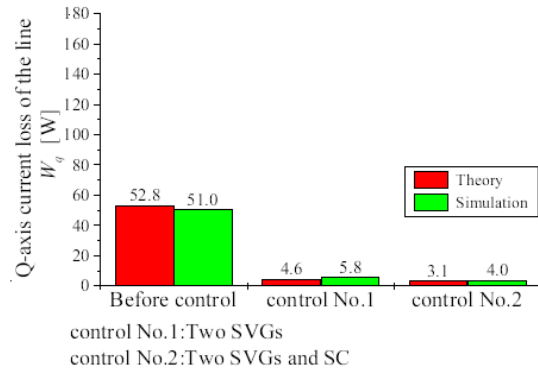


図9 SCを用いた損失低減結果

4.0W と損失低減がされている。以上より、SC 投入により、線路損失が理論通りに低減されており、SC 制御理論の有効性が検証されている。

(3) 無効電流を低減するための補償装置の配置と線路損失低減効果

図10は、3線路3負荷の配電システムモデルである。ノード1, 2, 3のいずれにSVGを設置するのが最も損失を低減できるかを明らかにする。

負荷1, 2, 3の無効電流 I_{L1q} , I_{L2q} , I_{L3q} および線路抵抗 R_1 , R_2 , R_3 を用いて、各線路の無効電流 I_{1q} , I_{2q} , I_{3q} および全線路損失 P_q は、次式で与えられる。

$$I_{1q} = I_{L1q} + I_{L2q} + I_{L3q}$$

$$I_{2q} = I_{L2q} + I_{L3q}$$

$$I_{3q} = I_{L3q}$$

$$P_q = R_1 |I_{1q}|^2 + R_2 |I_{2q}|^2 + R_3 |I_{3q}|^2$$

負荷2に並列にSVGを設置して無効電流による線路損失最小化するSVGの無効電流 I_{c2q} は次式で得られる。

$$I_{c2q} = -\frac{R_1}{R_2 + R_3} I_{L1q} - I_{L2q} - I_{L3q}$$

このときのSVG設置前に比較した損失低減量 ΔP_{q2} は次式で得られる。

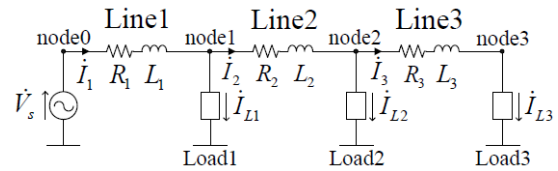


図10 3線路3負荷配電システムモデル

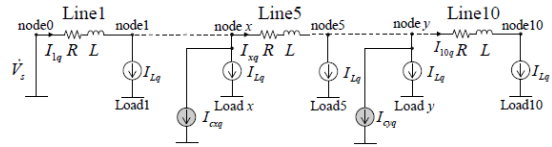


図11 10線路の2台SVGの最適設置点

$$\begin{aligned} \Delta P_{q2} = & R_1 (I_{L1q} + I_{L2q} + I_{L3q})^2 \\ & + R_2 (I_{L2q} + I_{L3q})^2 - \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_2} I_{L1q}^2 \end{aligned}$$

負荷1, 3にSVGを設置した場合にも同様に損失低減量 ΔP_{q1} , ΔP_{q3} を求めることができる。たとえば、全ての負荷電流が等しく I_{Lq} 、また線路の長さも等しく R としたときの負荷1~3にSVGを設置したときの損失低減量は、 $\Delta P_{q1} = 9RI_{Lq}^2$, $\Delta P_{q2} = 12.5RI_{Lq}^2$, $\Delta P_{q3} = 12RI_{Lq}^2$ と得られる。したがって、負荷2または3にSVGを設置することで、効果的な線路損失低減ができる。

同様に、最適なSVGの設置点を決めることができる。図11は10線路の配電システムモデルにおいて、ノード x , y の2箇所にSVGを設置するときの線路損失を最小化するノードを求める。全ての負荷電流が等しく I_{Lq} 、また線路の長さも等しく R としたときのノード x , y に設置した2箇所にSVGの補償電流 I_{cxq} , I_{cyq} はそれぞれ次式で与えられる。

$$I_{cxq} = -\left(\sum_{i=1}^{x-1} \frac{i}{x} + \sum_{i=1}^{y-x-1} \frac{i}{y-x} + 1 \right) I_{Lq}$$

$$I_{cyq} = -\left(\sum_{i=1}^{y-x-1} \frac{i}{y-x} + (11-y) \right) I_{Lq}$$

上式により無効電流補償をしたときの全線路損失 P'_q は、次式で得られる。

$$\begin{aligned} P'_q = & R \left[\sum_{i=1}^x \left\{ (11-i)I_{Lq} + I_{cxq} + I_{cyq} \right\}^2 \right. \\ & \left. + \sum_{i=x+1}^y \left\{ (11-i)I_{Lq} + I_{cyq} \right\}^2 + \sum_{i=1}^{10-y} (iI_{Lq})^2 \right] \end{aligned}$$

全線路損失 P'_q が最小となる x , y は、 $x=4.2$, $y=8.4$ と得られ、無効電流による全線路損失を最小化するSVGの設置点は $x=4$, $y=8$ と得られる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計6件)

- ① 朝倉良太, 竹下隆晴:「複数無効電流源による配電系統の線路損失最小化制御」, 平成 24 年電気学会 産業応用部門大会講演論文集, 1-101, pp. I-433-436, 2013 年 8 月 21 日~23 日, 千葉工業大学 (千葉県津田沼市)
- ② 朝倉良太, 竹下隆晴:「複数無効電流源による配電系統の線路損失最小化制御」, 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換技術・合同研究会資料, PE-13-016, PSE-13-032, SPC-13-052, pp. 43-48, 2013 年 3 月 4 日~5 日, 栗国島離島振興総合センター (沖縄県栗国村)
- ③ 宮崎賢祐, 朝倉良太, 竹下隆晴:「複数無効電流源によるループ配電系統の線路損失最小化制御」, 平成 25 年電気学会全国大会, 4-156, pp. 267-268, 2013 年 3 月 20 日~22 日, 名古屋大学 (名古屋市)
- ④ 宮崎賢祐, 竹下隆晴:「複数無効電流源と進相コンデンサによる配電系統の線路損失最小化制御」電気学会 産業応用部門大会講演論文集, 1-49, pp. 1-229-232, 2013 年 8 月 28 日~30 日, 山口大学 (山口市)
- ⑤ 宮崎賢祐, 竹下隆晴:「配電系統の線路損失最小化に着目した複数無効電流源の設置位置」, 電気学会 全国大会, 4-149, pp. 250-251, 2014 年 3 月 18 日~20 日, 愛媛大学 (松山市)
- ⑥ Kensuke Miyazaki, Takaharu Takeshita: "Line Loss Minimization in Radial Distribution System Using Multiple STATCOMs and Static Capacitors", Proceedings of 2014 International Power Electronics Conference -ECCE Asia-, IPEC-Hiroshima, 19P10-2, pp. 601-608, 2014 年 5 月 18 日~21 日, 広島国際会議場 (広島市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹下 隆晴 (TAKESHITA, Takaharu)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70171634