

计及分布式电源的配电网无功组合优化方法

无功优化是配电网运行中的重要内容，有效的无功优化方法对配电网的高效运行意义重大。提出了利用 DG 以及电容器组的配合实现配电网无功优化的两阶段方法，在第一阶段配置电容器组，在第二阶段配置 DG。提出了配置 DG 以及电容器组的数学模型，分析了含有电容器组和 DG 配电网有功损耗的计算方法，并且详细地给出了求解过程。并结合实际配电网给出了无功优化的组合优化方案。在最大、最小负荷情况下，利用所提出的方法，对配电网进行了无功优化。通过实际电网计算结果的分析 and 比较表明，配电网的有功损耗明显下降，电压水平明显改善，所提出的 DG 和电容器组的组合优化方法，可以适应配电网无功优化的需要。

孟晓芳¹ 王英男² 付立思¹ 王立地¹ 张 艳³/1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院 2. 沈阳市供电公司 3. 施耐德电气(中国)有限公司



孟晓芳/副教授

关键词/Keywords

分布式电源·
配电网·
无功优化·
组合优化·

在配电网中，要有充足的无功功率，保持无功平衡，否则将会引起电压下降，增加电能损耗，影响配电网的稳定运行^[1-3]。因此，各国对配电网的无功优化非常重视。

配电网的无功优化问题是一个多约束的非线性问题^[4,5]，可以通过固定或投切电容器组^[6]、静止无功补偿器(SVC)^[7]实现。由于电容器组运行维护方便，便于根据无功负荷需求实现就地平衡，已经成为配电网中有效的无功电源^[8]。

随着世界各国对传统能源、环境以

国家科技支撑计划课题“农村住宅多能互补节能技术集成与示范”(2012BAJ26B00)，辽宁省自然科学基金“分布式风电接入农村电网广义负荷模型研究”(201202191)，国家科技支撑计划子课题“低碳住宅庭院式微网供能控制系统”(2012BAJ26-B01—6)。

及可靠、易控的电力网建设关注的不断增加，大量分布式电源(Distributed Generation, DG)接入了配电网，传统的配电网发展为主动配电网^[8,9]。

DG 在配电网中的应用影响了配电网的潮流分布、规划设计和损耗等^[10,11]，DG 的配置影响配电网的运行^[12]。合理的配置 DG 可以减小配电网的损耗^[11-14]，调节无功分布^[15]，DG 已经成为重要的无功电源。但是，DG 接入配电网的容量受到技术和约束条件的限制^[16]，不能仅依靠 DG 优化配电网的无功分布。因此，配电网的无功优化问题需要通过 DG 以及其他无功电源协调实现。

本文研究的目的是综合利用 DG 以及电容器组实现配电网无功优化，研究配电网的无功组合优化方法，提出一种降低配电网损耗、改善电压曲线的两阶段配电网无功优化方法。

两阶段数学模型

本文将配电网无功优化问题分为两个阶段，在第一阶段配置电容器组，在第二阶段配置 DG。两个阶段中均考虑最大、最小负荷情况。

1. 电容器组的配置

根据文献[10]，无功补偿点选择为

$$\frac{\partial \Delta P_{\max}}{\partial I_{Q,j1}} K_{j1} = \min \left\{ \frac{\partial \Delta P_{\max}}{\partial I_{Q,1}} K_1, \frac{\partial \Delta P_{\max}}{\partial I_{Q,2}} K_2, \dots, \frac{\partial \Delta P_{\max}}{\partial I_{Q,N}} K_N \right\} \quad (1)$$

式中， K_i 为节点 i 允许的无功补偿系数， $i = 1, 2, \dots, N$ ； $I_{Q,i}$ 为节点 i 的补偿电流，

A; $\Delta P_{\max}$ 为最大负荷时的有功损耗, kW; N 为配电网的节点总数。

选择三个补偿点, 各补偿点电容器组的容量按补偿后经济效益最大的原则确定。设负荷水平用 m 表示 (取值为 1 和 2), 配置电容器组后的经济效益为 C , 则配置电容器组的目标函数为 $\max C$ 。设 K_Q 为补偿装置每千瓦时的计算费用, ΔP_m 为负荷水平 m 时装设补偿装置后有功率损失的减小值, kW, 则

$$C = \sum_{m=1}^2 \left(\beta \Delta P_m T_m - K_Q T_m \sum_{i \in \Gamma} Q_{c.m.i} \right) \quad (2)$$

$$K_Q = \frac{(K_a + K_e) K_c}{T} + \Delta P_c \beta \quad (3)$$

式中, β 为电价, 元/kW·h; $Q_{c.m.i}$ 为负荷水平 m 时节点 i 配置电容器的容量, kvar; K_c 为补偿装置单位容量的综合投资, 元/kvar; K_a 为补偿装置的年运行维护费用率; K_e 为年投资回收率; T_m 为负荷水平 m 时的运行小时数, h; ΔP_c 为补偿装置单位无功容量的有功损耗, kW/kvar; Γ 为配置电容器的节点集合。

不同负荷水平下配置电容器组时除了满足功率平衡条件以及功率因数的限制条件外, 还需要满足约束条件

$$\begin{cases} U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \\ I_l \leq I_{l,\max} \\ Q_{Cmin,i} \leq Q_{C,i} \leq Q_{Cmax,i}, i \in \Gamma \\ \sum_{i \in \Gamma} Q_{C,i} < \sum_{i=1}^N Q_{Li} \end{cases} \quad (4)$$

式中, U_i 为节点 i 的电压, kV; $U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 电压的最小、最大允许值, kV; I_l 和 $I_{l,\max}$ 分别为支路 l 的电流和支路 l 的最大电流, A; $Q_{C,i}$ 为节点 i 补偿的无功容量, kvar; Q_{Li} 为节点 i 的无功负荷, kvar; $Q_{Cmin,i}$ 、 $Q_{Cmax,i}$ 分别为节点 i 无功补偿容量的最小、最大值, kvar。

2. DG 的配置

在满足节点优先等级的前提下^[3], 根据“2/3原则”确定 DG 的初始配置点^[4], 根据不同负荷情况下年电能损失最小及节点电压偏移最小的原则确定 DG 位置和容量。配置 DG 的目标函数为

$$\begin{cases} \min \Delta A = \sum_{m=1}^2 \Delta P_{\text{loss},m} T_m \beta \\ \min \Delta U_i = |U_i - U_N| \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\Delta P_{\text{loss},m}$ 为负荷水平 m 时配电网的总有功损耗, kW; ΔU_i 为节点 i 的电压偏移量, kV; U_N 为配电网的额定电压, kV; Ω 为配电网的节点集合。

除了满足功率平衡条件以及约束条件之外, 还需要满足约束条件

$$\begin{cases} \sum_{i \in B} P_{DG,i} \leq P_{DG\Sigma\max} \\ P_{DGmin,i} \leq P_{DG,i} \leq P_{DGmax,i} \\ \sum_{i \in B} Q_{DG,i} \leq Q_{DG\Sigma\max} \\ Q_{DGmin,i} \leq Q_{DG,i} \leq Q_{DGmax,i} \\ 0 < \cos \varphi < 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $P_{DG,i}$ 为节点 i 安装 DG 的有功功率, kW; $P_{DG\Sigma\max}$ 为安装 DG 的总有功功率, kW; $P_{DGmin,i}$ 、 $P_{DGmax,i}$ 分别为节点 i 可安装 DG 有功功率的最小、最大有功功率, kW; $Q_{DG,i}$ 为节点 i 安装 DG 的无功功率, kvar; $Q_{DG\Sigma\max}$ 为可安装 DG 的最大无功功率, kvar; $Q_{DGmin,i}$ 、 $Q_{DGmax,i}$ 分别为节点 i 可安装 DG 的最小、最大无功功率, kvar; $\cos \varphi$ 为网络的平均功率因数。

求解过程

在第一阶段利用步长加速法配置电容器组, 如图 1 所示; 在第二阶段配置 DG, 如图 2 所示。图 2 中配置 DG 的条件包括式 (5) 以及配置 DG 时需要满足的约束条件。

配电网损耗的计算

为了分析无功优化后配电网有功损耗的变化, 首先需要计算配置 DG 和电容器组前后的支路电流。忽略配电网中所有线路对地支路的影响, 根据文献 [5], 设 I_{SC} 为所有电容器组的注入电流列矢量, I_{SL} 为所有节点负荷的注入电流列矢量, I_{SDG} 为所有 DG 形成的注入电流列矢量, 则配置 DG 和电容器组前网络的节点注入电流 I_N 为

$$I_N = I_{SL} \quad (7)$$

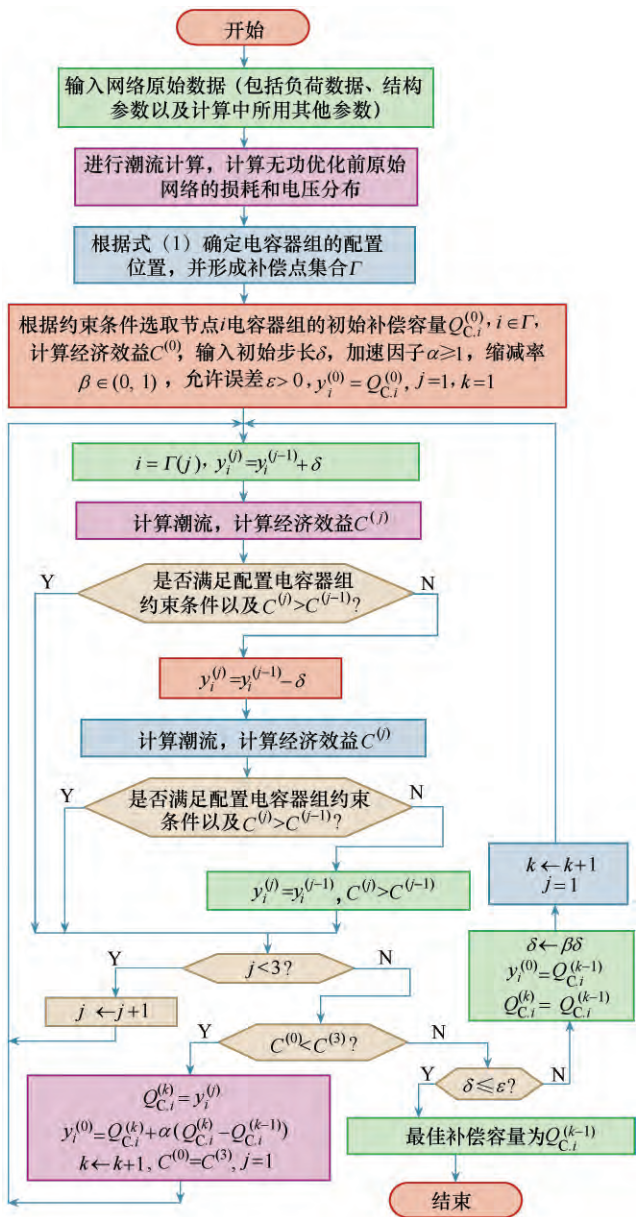


图1 电容器组的配置

配置 DG 和电容器组后网络的节点注入电流 I_N 为

$$I_N = I_{SC} + I_{SL} + I_{SDG} \tag{8}$$

对于纯辐射式网络, 支路电流列矢量 I_b 为

$$I_b = TI_N \tag{9}$$

式中, T 为支路道路关联矩阵^[14]。

设 b 为网络的总支路数, 则配电网的总有功损耗 ΔP_{loss} 为

$$\Delta P_{loss} = 3 \times 10^{-3} \left(\sum_{l=1}^b |I_l|^2 R_l \right) \tag{10}$$

式中, R_l 为配电网支路 l 的电阻, Ω ; I_l 为配

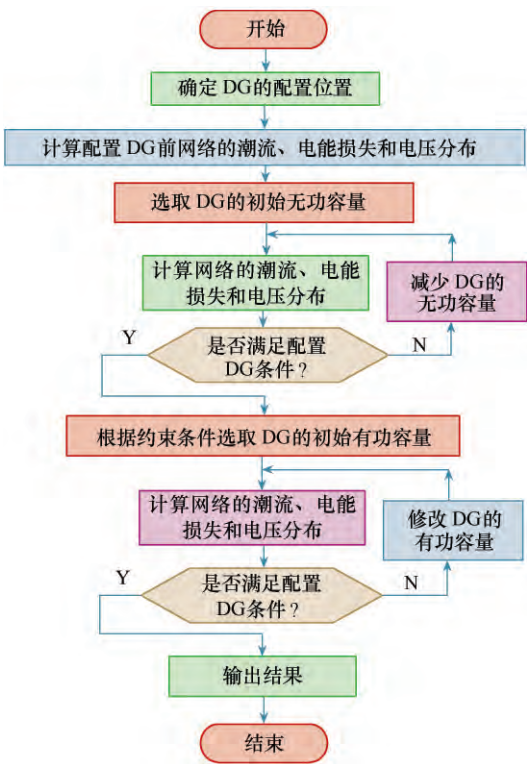


图2 DG 的配置

网络支路 l 的电流, A ; b 为配电网的总支路数。

实例分析

本文以图 3 所示的 10 kV 配电网以及其 2009 年负荷为例进行分析, 网络的总最大负荷为 48.08 MW + j29.88 Mvar, 网络的总最小负荷为 35.47 MW + j22.1 Mvar, T_{min} 、 T_{max} 取为年运行时间的 1/2。计算时采用标幺制, 功率和电压基准值分别取为 100 MV · A 和 10.5 kV。

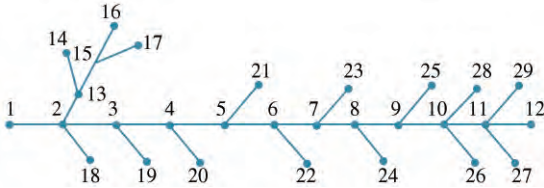


图3 10 kV 辐射式网络图

根据上述方法, DG 配置容量、地点如表 1 所示, DG 的最大容量不超过总有功负荷的 30%。电容器组的配置容量、地点如表 2 所示。

无功组合优化的第一阶段网络只配置表 2 中“电容器组 I”; 第二阶段网络配置表 2 中“电容器组 II”以及表 1 中 DG 进行无功优化, 即第二阶段为电容器组与 DG 的组合优化方案。

表 1 DG 的配置位置及容量

负荷情况	配置 DG	配置 DG 容量 (pu)		DG 功率 因数
	节点编号	有功功率	无功功率	
最小负荷	11	0.089 475	0.055 452	0.85
最大负荷	11	0.118 825	0.073 642	0.85

表 2 电容器组配置位置及容量

配置电容器 节点编号	电容器组 I (pu)		电容器组 II (pu)	
	最小负荷	最大负荷	最小负荷	最大负荷
5	0.056 9	0.057 9	0.056 9	0.057 9
9	0.044 565	0.079 545	0.044 565	0.079 545
11	0.055 452	0.075 92	0	0.002

表 3 有功损耗和功率因数比较

负荷情况	无功优化前 网络总有功损耗 (pu)	无功优化后网络总有功损耗 (pu)		网络总有功损耗下降率		平均功率因数无功优化		
		第一阶段	第二阶段	第一阶段	第二阶段	无功优化前	第一阶段	第二阶段
最小负荷	0.027 905 4	0.020 099 5	0.009 149 9	27.97%	67.21%	0.849 8	0.900 9	0.921 2
最大负荷	0.050 314 3	0.035 769 5	0.015 224 0	28.91%	69.74%	0.849 7	0.900 4	0.920 2

表 4 最小节点电压比较

负荷情况	无功优化前		无功优化后网络最小节点电压			
	节点编号	网络最小节点 电压 (pu)	第一阶段 节点编号	节点电压 (pu)	第二阶段 节点编号	节点电压 (pu)
最小负荷	29	0.959 612	29	0.974 536	25	1.003 714
最大负荷	29	0.928 269	29	0.950 345	25	0.989 853

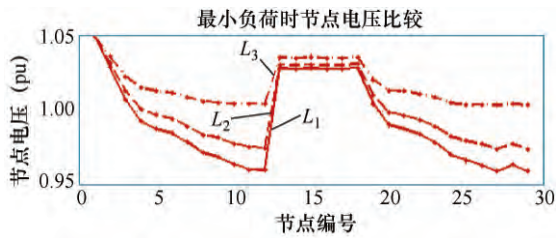


图 4 最小负荷时的节点电压曲线

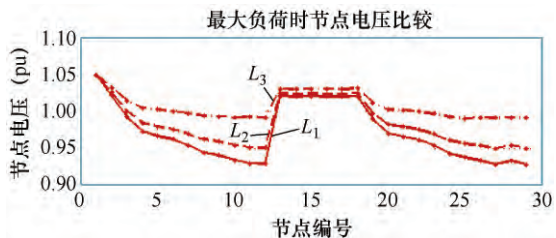


图 5 最大负荷时的节点电压曲线

根据表 4、图 4 和图 5 可以看出，无功优化对

无功优化第一阶段、第二阶段的有功损耗、平均功率因数以及最小节点电压比较分别如表 3、表 4 所示。根据表 3 可以看出，实施无功优化第一阶段、第二阶段后，网络的有功损耗均减少了，而且采用第二阶段后的有功损耗下降更多。

无功优化前、无功优化第一阶段和第二阶段的各节点电压曲线如图 4、图 5 所示。图 4 为最小负荷时的节点电压曲线，图 5 为最大负荷时的节点电压曲线。图 4、图 5 中曲线 L_1 为无功优化前的节点电压曲线， L_2 为实施无功优化第一阶段后的节点电压曲线， L_3 为实施无功优化第二阶段后的节点电压曲线。

网络电压水平的改善非常明显。特别是采取第二阶段后，各节点的电压非常接近额定电压。

结束语

配电网的无功优化是配电网运行中的重要内容，有效的无功优化方法对配电网安全、可靠和经济运行意义重大。本文对有源配电网的无功优化问题进行了研究，并提出了利用电容器组和 DG 实现无功优化的组合优化方案。根据本文的分析以及算例的结果分析得出以下结论。

- 1) 利用 DG 和电容器组形成组合优化方案进行无功优化时，需要合理配置 DG 和电容器组，确定它们的位置和容量。
- 2) 配电网进行无功优化后，配电网的有功损耗明显下降，电压水平明显改善，而且采用 DG

和电容器组的组合优化方案时效果更加明显。

3) 在下一步的研究中, 可以利用 DG 和电容器的组合研究配电网的无功优化和电压调节问题, 形成组合优化方案, 提高配电网的运行性能。

参考文献

- [1] Ryan J Konopinski, Pradip Vijayan, Venkataramana Ajjarapu. Extended reactive capability of DFIG wind parks for enhanced system performance [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24 (3): 1346-1352.
- [2] Ying Yi Hong, Kuan Lin Pen. Optimal VAR planning considering intermittent wind power using markov model and quantum evolutionary algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (4): 2987-2996.
- [3] 朴在林, 孟晓芳. 农村电力网规划 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [4] Liu M B, Claudio A C, Huang W. Reactive power and voltage control in distribution systems with limited switching operations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24 (2): 889-899.
- [5] Peter J M, Gareth A T, Malcolm R I, et al. Proposed shunt rounding technique for large - scale security constrained loss minimization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (3): 1478-1485.
- [6] Benemar Alencar de Souza, Angelo Márcio Formiga de Almeida. Multi - objective optimization and fuzzy logic applied to planning of the Volt/Var problem in distributions systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (3): 1274-1281.
- [7] Jizhong Zhu, Kwok Cheung, Davis Hwang, et al. Operation strategy for improving voltage profile and reducing system loss [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (1): 390-397.
- [8] Yasser Abdel - Rady I Mohamed, Amr A Radwan. Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2 (2): 352-362.
- [9] Jinwei He, YunWei Li, Md Shirajum Munir. A Flexible harmonic control approach through voltage - controlled DG - grid interfacing converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (1): 444-455.
- [10] 孟晓芳, 朴在林, 王珏. 计及负荷不确定性的农网无功优化方法 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (9): 182-187.
- [11] Hugo A. Gil, Geza Joos. Models for quantifying the economic benefits of distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23 (2): 327-335.
- [12] Atwa Y M, El - Saadany E F, Salama M M A, et al. Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010ZJ (1): 360-370.
- [13] 孟晓芳, 朴在林, 解东光, 等. 分布式电源在农村电力网中的优化配置方法 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (8): 243-247.
- [14] 孟晓芳, 朴在林, 王英男, 等. 考虑分布式电源影响的配电网降损分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (增刊): 128-131.
- [15] Delfino F, Procopio R, Rossi M, et al. Integration of large - size photovoltaic systems into the distribution grids: a P - Q chart approach to assess reactive support capability [J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4 (4): 329-340.
- [16] Chris J Dent, Luis F Ochoa, Gareth P Harrison. Network distributed generation capacity analysis using OPF with voltage step constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (1): 296-304.

(收稿日期: 2014-04-11) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告