

考虑分布式光伏无功出力特性的配电网 无功优化配置

王晶^{1*}, 王曦炜², 杨增力¹, 吴迪¹, 张振¹

(1. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 闵行 200240)

摘要: 大规模分布式电源接入配电网会给配电网带来电压越限的问题, 需要额外配置无功补偿设备, 同时接入的分布式电源渗透率不同、风光配比不同, 也会影响配电网的电压越限程度。文章考虑分布式光伏的无功出力特性, 提出了一种新型配电网无功优化配置模型, 在利用分布式光伏发电的同时作为无功调节设备参与配电网调压, 从而减少额外无功补偿设备的配置。分析了分布式光伏在正常运行以及合理弃光的情况下的无功补偿能力, 在此基础上, 以配电网损耗成本与无功补偿设备配置成本最小为目标构建配电网无功优化配置模型, 构建不同渗透率以及不同分布式风光接入比例的配电网算例, 并验证该优化模型的有效性。

关键词: 分布式电源; 电压越限; 无功出力特性; 无功优化配置

中图分类号: TM766

Optimal Allocation of Reactive Power Compensation in Distribution Network Considering Distributed Photovoltaic Reactive Power Output Capability

WANG Jing^{1*}, WANG Xiwei², YANG Zengli¹, WU Di¹, ZHANG Zhen¹

(1. State Grid Hubei Power Co., Ltd, Hubei Wuhan 430077, China; 2. School of Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai Minxing 200240, China)

Abstract: Large-scale distributed generation connecting to the distribution network will cause the problem of voltage overshoot, which requires additional configuration of reactive power compensation equipment. Meanwhile, different permeability of distributed power supply access and different photovoltaic-wind ratio will also affect the voltage overshoot degree of the distribution network. Considering the voltage regulation capability of distributed photovoltaic power source, this paper proposes a new optimal allocation model of reactive power compensation for distribution network, which uses distributed photovoltaic power generation as reactive power regulation equipment to participate in the voltage regulation of distribution network, so as to reduce the allocation of additional reactive power compensation equipment. Firstly, the reactive power compensation capability of distributed PV under normal operation and reasonable light abandonment is analysed respectively. On this basis, the optimal allocation model of distribution network reactive power compensation is constructed with the goal of minimizing the loss cost and reactive power compensation equipment allocation cost. Finally, an example of distribution network with different permeability and different distribution wind access ratio is constructed to verify the effectiveness of the optimization model.

Keywords: distributed power supply; voltage overshoot; reactive power output characteristics; optimal reactive power configuration

0 引言

随着国家“双碳”战略目标的提出、新型电力系统建设的推进, 配电网将接入大量的分布式能源、

收稿日期: 2023-12-03; 修回日期: 2024-01-22

微网、储能设施等有源设备。将有大量分布式电源接入配电网, 新能源渗透率将会持续提升, 电网运行情况更加复杂, 配电网将会出现电压越限的问题, 因此须对配电网的分布式电源及无功补偿装置进行优化, 以保证配电网损耗与电压偏差小的情况下提

高配置的经济性。

分布式电源的接入一方面使得传统的单端电源辐射状配电网变成多端电源供电的复杂网络，配电网的电压情况易受分布式电源影响，因此须采取相应的无功补偿措施。另一方面，由于分布式电源自身的功率输出特性，其在电网中可以起到一定的调节作用，甚至能作为可控单元参与配电网调压。针对分布式电源接入配电网后配电网无功补偿方面的研究受到国内外学者的高度重视，取得了许多成果。文献 [1-2] 介绍了分布式电源接入配电网后的配电网规划与运行方法。文献 [3-4] 着重分析了分布式电源接入配电网的容量、位置等因素对配电网电压的影响，通过建立典型配电网模型进行仿真，得到分布式电源接入配电网会使配电网电压抬升的结论，同时抬升的程度与接入点的位置以及分布式电源接入的容量相关，接入位置越靠近末端、接入的容量越大则电压抬升效果越明显。文献 [5-7] 针对光伏电源和风电场接入电网的不同特性，提出了基于无功补偿装置的电网电压控制策略，充分利用了无功补偿装置的处理特性以及新能源的功率调节能力，提高了电网运行的经济性。

以上研究仅考虑分布式光伏的出力特性对配电网电压的影响，而未充分考虑分布式光伏的结构特性带来的无功补偿能力，因此仅实现了利用不同位置以及容量的分布式电源来完成配电网规划阶段的电压调节。本文考虑分布式光伏电源的结构与静止无功补偿器的相似性，分析分布式光伏在低出力情况下进行无功补偿的可行性；针对配电网中接入大量分布式电源的情况，考虑不同的分布式电源渗透率情况，提出考虑分布式光伏无功补偿能力的配电网无功补偿优化配置方案；通过设计大量分布式电源接入配电网的算例，验证最优容量配比的电压调整效果以及模型有效性。

1 分布式光伏参与调压的原理

1.1 分布式光伏电源接入对配电网电压控制的影响

由于配电网线路的阻抗比 (R/X) 较大，线路中传输的有功功率对电压的支撑作用明显，而分布式光伏直接向配电网输送有功功率会在一定程度上抬高配电网电压，分布式光伏电源同时也具备发出和

吸收无功功率的功能，这也可以为调节配电网节点电压幅值提供有效的方法。分布式光伏电源的接入对配电网电压的影响情况由接入容量、接入位置以及运行时的功率因数决定，而多个分布式光伏电源同时接入配电网后对电压的影响情况将会更加复杂，因此首先考虑单个分布式光伏电源接入的情况。

分布式光伏电源接入位置对配电网电压的影响：分布式光伏电源正常运行状态下可以将其功率因数视为 1，因此在接入配电网后会向配电网输入有功功率，从而使得接入点的电压升高，而其他节点也会随着分布式光伏电源的输出变化出现不同程度的电压抬升。分布式光伏电源的接入会使配电网该支路全部节点电压升高，且接入点越靠近线路末端，电压抬升越明显。在规划分布式光伏电源接入的位置时须考虑有功输入的变化对节点电压的影响，防止出现电压越限的情况。

分布式光伏电源接入容量对配电网电压的影响：基于上一小节分析，分布式光伏电源输出有功功率会使配电网节点电压抬升，同时认为分布式光伏的发电量与容量变化率相同，则配电网电压抬升程度与分布式光伏电源接入的容量呈正相关。

分布式光伏电源功率因数对配电网电压的影响：由于分布式光伏电源在结构上有接地电容具备无功补偿功能，因此在输送有功功率的同时可以发出（或吸收）无功功率进而可以调节节点电压。

1.2 正常运行情况下的有功无功协调调压方法

分布式光伏电源在输出有功功率时若还剩余部分容量，则可用于输出无功功率进行电压调节，具体表现为并网点电压高于目标值时分布式光伏电源通过吸收无功功率来降低电压，当并网点电压低于目标值时分布式光伏电源则发出无功功率来抬升电压。

当分布式光伏电源剩余容量不足以满足并网点电压无功调节需求时，须考虑通过适当减少有功输出，从而增加无功调节范围；在此调节方法下，须设定有功出力阈值，以确保在满足无功调节需求的情况下仍有较高的光伏利用率。

1.3 低出力情况下的无功调压方法

在低出力状态或夜间运行状态光伏逆变器可充当无功补偿器为配电网输送无功功率提供电压支撑。

如图 1 所示，当分布式光伏运行在区域 I 时为正常有功出力状态，此时分布式光伏的功率因数为 0.85 及以上，因此有功出力大而无功出力范围受限；当分布式光伏运行在区域 II 时为低出力运行状态，此时由于光照不足无法达到较高有功出力，因此可以通过外置控制模块使分布式光伏的功率因数低于 0.85，进而利用剩余容量参与配电网无功调节；当分布式光伏运行在区域 III 为夜间无出力状态，此时分布式光伏需要从配电网系统吸收少量有功功率为接地电容进行充放电，从而使用全部容量参与配电网无功补偿。

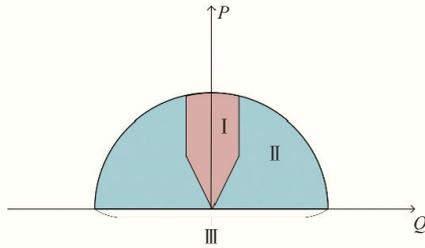


图 1 分布式光伏有功无功协调控制图

2 考虑分布式光伏调压能力的配电网无功补偿优化配置模型

2.1 目标函数

本方法考虑的分布式电源主要为分布式光伏与分布式风机，以分布式电源配置容量以及无功补偿装置配置容量为决策变量，考虑有功损耗成本、分布式电源配置成本、无功补偿成本以及弃风弃光成本建立目标函数：

$$\min C = C_{\text{loss}} + C_{\text{DG}} + C_{\text{com}} + C_{\text{DGloss}} \quad (1)$$

式中： C_{loss} 为配电网有功损耗成本； C_{DG} 为分布式电源年化配置成本； C_{com} 为无功补偿配置成； C_{DGloss} 为弃光成本。

配电网有功损耗成本：

$$C_{\text{loss}} = c_P P_{\text{loss}} T_{\text{max}}$$

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i,j \in N} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})$$

式中： c_P 为单位上网电价； T_{max} 为规划考虑的电网运行时长； G_{ij} 为线路 ij 的导纳参数； V_i 为节点 i 电压； θ_{ij} 为电压相角差。

分布式电源配置年化成本：

$$C_{\text{DG}} = \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \sum_{i=1}^N (S_{iPV} c_{iPV} + S_{iWG} c_{iWG}) + \sum_{i=1}^N (S_{iPV} c_{MPV} + S_{iWG} c_{MWG})$$

式中： r 为贴现率； m 为分布式电源最大使用年限； S_{iPV} 与 S_{iWG} 分别表示节点 i 处接入的分布式光伏与分布式风机容量； c_{iPV} 与 c_{iWG} 分别表示分布式光伏与分布式风机单位容量配置成本； c_{MPV} 与 c_{MWG} 分别表示分布式光伏与分布式风机单位容量年维护成本。

无功补偿成本：

$$C_{\text{com}} = c_{\text{com}} S_C$$

式中： c_{com} 为单位容量无功补偿配置成本； S_C 为系统配置的总无功补偿装置容量。

弃风弃光成本：

$$C_{\text{DGloss}} = c_P P_{aPV}$$

式中： P_{aPV} 为分布式光伏弃光量。

2.2 约束条件

节点电压约束：

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (2)$$

式中： $V_{i,\min}$ 与 $V_{i,\max}$ 为节点 i 处允许的电压最小值与最大值。

潮流约束：

$$\begin{cases} P_{Gi} + P_{DGi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} + Q_{Ci} = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： P_{Gi} ， Q_{Gi} 为节点 i 注入的有功及无功功率； P_{DGi} 为节点 i 处分布式电源注入的有功功率； P_{Li} ， Q_{Li} 为节点 i 处的有功及无功负荷； Q_{Ci} 为节点 i 处配置的无功补偿量。

支路最大功率约束：

$$P_i \leq P_{i,\max} \quad (4)$$

式中： $P_{i,\max}$ 表示 i 支路允许通过的最大有功功率。

分布式电源装机容量约束：

$$0 \leq S_{\text{DG,total}} \leq P_{\text{load}} R_P \quad (5)$$

式中： $S_{\text{DG,total}}$ 为分布式电源接入总容量； P_{load} 为系统总负荷； R_P 为分布式电源最大渗透率。

分布式光伏电源无功补偿约束：

$$0 \leq Q_{DGi} \leq \sqrt{S_{DGi}^2 - P_{DGi}^2} \quad (6)$$

分布式电源有功出力约束：

$$P_{DGi} = S_{DGi} R_{a,t} \quad (7)$$

式中： $R_{a,t}$ 为不同时刻的环境因素指标，对应分布式光伏为当前时刻光照强度，对应分布式风机为当前时刻的风力大小。

考虑分布式光伏存在通过弃光参与无功调节的运行方式，因此引入分布式光伏弃光约束：

$$S_{PVi} R_{a,t} (1 - R_{aPV}) \leq P_{PVi} \leq S_{PVi} R_{a,t} \quad (8)$$

式中： R_{aPV} 为分布式光伏允许的最大弃光率。

3 算例分析

3.1 算例设计

算例仿真与分析在 IEEE 33 节点系统上进行。考虑大量分布式电源接入配电网的情况，将电压偏移量较大的节点设为分布式电源的安装节点，设置上网电价为 350 元/(MW·h)，节点电压最大偏差值为 10%，分布式光伏发电成本为 120 元/(MW·h)，分布式风机发电成本为 150 元/(MW·h)，无功补偿单位补偿量成本为 140 元/(Mvar·h)，其中运行成本为 120 元/(Mvar·h)，无功补偿激励成本为 20 元/(Mvar·h)，允许最大弃光率为 20%，分布式电源渗透率由 15% 变化至 45% 进行仿真，分布式电源渗透率为分布式电源接入总容量与配电网系统中有功负荷总容量之比，通过利用分布式光伏电源的调压能力替代静止无功补偿器，优化得到不同渗透率下的最优分布式风光容量配比。负荷波动情况如图 2 所示，分别使用一年四个季度的典型日负荷模拟全年系统运行，而分布式光伏和分布式风机全年出力数据按照图 3、图 4 所示。

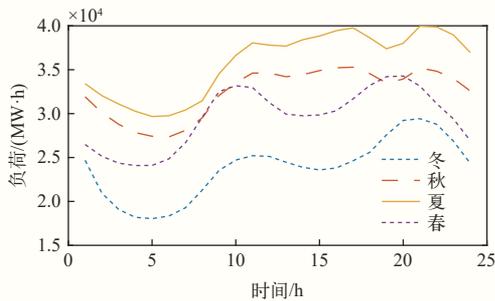


图2 四季典型日负荷曲线

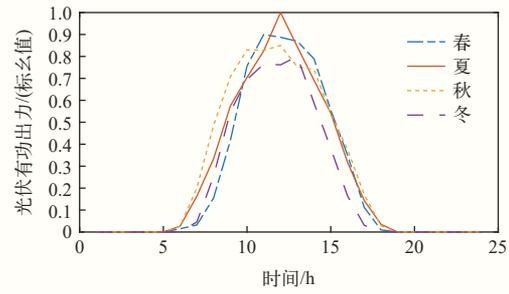


图3 四季分布式光伏出力曲线

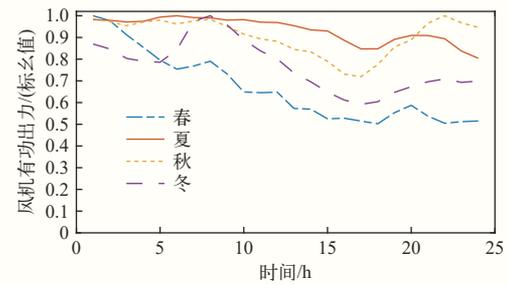


图4 四季分布式风机出力曲线

3.2 大规模分布式电源接入配电网最优容量比

通过算例以及最优模型得出接入配电网的分布式光伏与分布式风机的最优容量比以及相应最优无功补偿容量配置方案，记为方案一，并将仅使用 SVG 进行无功补偿的配网运行方案记为方案二，优化结果如表 1 所示。

表1 2种方案优化结果对比表格

渗透率/%	分布式光伏容量/MW	分布式风机容量/MW	分布式光伏与风机容量比	方案一		方案二	
				年均运行成本/元	SVG配置容量/Mvar	年均运行成本/元	SVG配置容量/Mvar
15	0.00	0.60	0.00	467 461.0	0.365	467 461.00	0.368 00
20	0.14	0.76	0.18	506 961.0	0.255	543 664.00	0.378 64
25	0.40	0.80	0.50	553 710.0	0.038	605 851.00	0.386 00
30	0.57	0.93	0.62	581 162.0	0	679 005.00	0.390 00
35	0.80	1.00	0.80	673 139.0	0	752 856.00	0.410 00
40	1.08	1.02	1.06	765 741.2	0	816 558.00	0.420 00
45	1.40	1.00	1.40	868 193.1	0	884 084.50	0.428 00

如表格结果所示，在分布式电源渗透率处于 15%~25% 期间时，随着渗透率提高分布式光伏逐渐取代无功补偿装置，而当渗透率超过 30% 之后，分布式光伏已完全取代无功补偿装置，同时随着渗

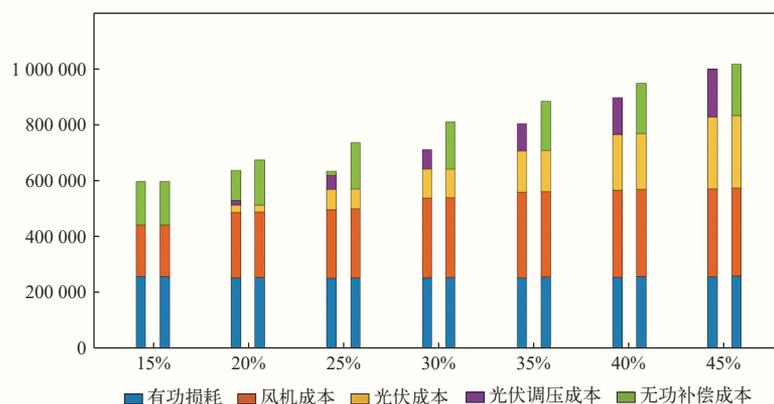


图5 2种方案系统运行成本组成分析

透率的增加，分布式光伏与分布式风机装机比例逐渐增大，这一结果表明随着渗透率的增加，配网中应该接入更多具有调压能力的分布式光伏来满足电网的无功补偿需求。图5中对比了不同渗透率情况下的成本组成情况，可见随着渗透率增加，总运行成本的增加主要是由于分布式电源的配置以及运行维护成本增加导致的；在无功补偿方面，随着渗透率提高无功补偿装置需求也逐渐提高，但采取分布式光伏进行无功调压的方案一仍然可以不额外配置无功补偿设备，这也证明该优化配置模型的有效性。

4 结论

本文通过分析分布式电源接入配电网带来的影响基础上，考虑分布式光伏的调压能力，以年综合费用最小为目标，建立分布式电源容量比例优化配置模型，并在 IEEE 33 节点上进行仿真和分析，得到以下结论：

分布式电源接入配电网可以在一定程度上缓解电网有功损耗，但是在常规控制方式下须配置相应的无功补偿设备来实现节点电压稳定，而分布式光伏可以通过增加控制模块从而实现对配电网的有功无功协调控制，因此对配电网的电压调节效果更为显著；

随着分布式电源渗透率的提高，分布式光伏与分布式风机的接入容量比例也逐渐提高，这是由于高渗透率的分布式电源会给电网带来更大的无功补偿需求，而改进过后的分布式光伏可以有效缓解配电网对无功补偿装置的依赖，从而降低了配置成本；

与传统的无功补偿方式相比，考虑分布式光伏

无功补偿能力的配置方案可以降低无功补偿器配置容量，且随着渗透率的增加对无功补偿装置的优化效果越明显，经济效益越好。

目前市场上对分布式光伏控制模块改进技术暂不成熟，在高渗透率情况下的经济效益不明显，随着技术发展以及装置优化，该优化方案对配电网调压过程的优化效益将会更加明显。

参考文献

- [1] 李珂. 含分布式电源的配电网规划与运行研究[D]. 上海交通大学, 2017.
- [2] 董媛媛. 含分布式电源的配电网规划与优化运行[D]. 南昌大学, 2020.
- [3] 杨艳芳. 分布式电源并网后配电网调压问题的研究[D]. 华北电力大学(河北), 2008.
- [4] 陈芳. 含分布式电源的智能配电网中调压问题研究[D]. 北京交通大学, 2011.
- [5] L. Liu, H. Li, Y. Xue and W. Liu, "Reactive Power Compensation and Optimization Strategy for Grid-Interactive Cascaded Photovoltaic Systems", in IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 1, (30): 188-202.
- [6] O. E. Ochoa Robles, J. A. Beristain Jimenez and J. Perez Ramirez, "Reactive Power Compensation in a Photovoltaic Grid Tie System, Using a Single-Phase Bidirectional High Frequency link Converter", in IEEE Latin America Transactions, 2016, 4, (14): 1816-1821.
- [7] S. Ghosh, Y. J. Isbeih, R. Bhattarai, M. S. E. Moursi, E. F. El-Saadany and S. Kamalasan, "A Dynamic Coordination Control Architecture for Reactive Power Capability Enhancement of the DFIG-Based Wind Power Generation", in IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 4, (35): 3051-3064.

作者简介

王晶(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电力系统继电保护, E-mail: 58099687@qq.com.

(责任编辑: 袁航)