

含新能源场站的变电站无功优化

张大伟¹, 梅晋¹, 王彦洋¹, 马瑞光², 吴冠男³

(1.国网四川省电力公司, 四川 成都 610095; 2.国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610095; 3.清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 随着新能源大规模地接入电网,传统潮流计算已不能满足配电网的需求,配电网无功配置的有效性降低,进而影响整个配电网的安全稳定性。为此,文章对含新能源场站的变电站潮流影响特性进行分析,建立新能源场站接入地区电网的PCC节点模型,以面向支路前推回代法作为配电网潮流计算方法;分析含新能源场站接入的变电站无功补偿特性,基于等量分组方式对无功补偿电容器作出规划。最后以某变电站为例,对所提计算方法的可行性进行验证,充分证明了该方法的有效性。

关键词: 新能源场站; 潮流计算; 无功补偿; 负荷预测

中图分类号: TK01; TM714.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)10-1416-05

0 引言

随着光伏、海上风电等大规模间歇性清洁能源不断并入电网,配电网系统变得愈加庞大与复杂^[1-2]。在无功规划方面,微电网出力的不确定性使得配电网的用电需求以及用电负荷的变化特性愈加难以预测,大大降低了配电网无功补偿规划的准确率^[3-6]。因此,深入研究含微电网的配电网无功规划,对提升配电网对清洁能源的消纳力以及保障电网的可靠运行具有重要作用。文献[7]分析了变电站无功补偿的优化协调与电容器的分组配置问题,基于超调率指标以及改进遗传算法构建了一套无功优化配置的数学模型,快速求解得到最优无功配置结果。文献[8]通过分析DG接入对配电网的影响,从并网后对配电网的控制问题出发协调周边负荷,总结出对配电网规划及电压水平的控制策略;从选取接入位置容量评估接入后消纳水平,并分析其接纳能力,总结提升措施。文献[9,10]提出一种基于超调率指标的无功优化配置方法,通过构建变电站无功优化规划指标体系,以无功超调率指标协调无功配置组数与单组容量之间的矛盾。文献[11]建立了储能系统接入电网的潮流计算模型,基于改进型粒子群算法对系统的补偿装置的配置容量以及安装位置进行计算。仿真结果表明,合理的布点位置及容量配置可以有效改善新能源并网后电网的潮流分布,从

而提高新能源消纳能力。文献[12,13]提出了基于时间序列与耦合分析的区域综合能源系统多能潮流计算方法,利用时间序列分析获取系统的运行频率,构建了区域综合能源系统稳态网络模型,分别对电力系统与热力系统潮流进行计算,并通过电热耦合分析,得到该系统多能潮流计算结果。

本文根据电网的基本架构分析新能源接入对潮流特性的影响,将新能源电网看作静态器件和电机部件构成的整体,搭建新能源场站接入地区电网的PCC节点模型。基于面向支路前推回代法对配电网展开潮流计算,并对电容器的容量及分组进行配置,优化无功补偿。

1 潮流影响特性分析

微电网包含各种间歇性的清洁能源,其输出往往由于天气等条件的影响而具有随机性和波动性。因此,微电网接入配电网后,其不确定性增加了准确预测配电网的负荷变化和用电需求的难度,进而导致配电网无功规划的准确性降低。同时,配电网潮流方向的单一性是通过闭环设计和开环运行来保证的,然而,新能源场站的接入使得配电网中的潮流方向具有不确定性,导致配电网中节点电压分布的不确定性变化,容易引起无功补偿设备动作频繁,特别是电容器的振荡投切。传统潮流计算算法不再能满足要求,因此有必要对传统潮流计算算法做出改进。此外,新能源场站的

收稿日期: 2024-04-30。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5108-2023266039A-1-1-ZN)。

作者简介: 张大伟(1984-),男,硕士,高级工程师,研究方向为调度自动化系统运行管理。E-mail: zdw_1@126.com

通信作者: 吴冠男(1986-),男,助理研究员,主要从事新能源并网技术与新型电力系统宽频动态研究。E-mail: wuguannan722@163.com

接入使配电网从无源网络转变成多源弱环路网络,负荷变化、微网输出和潮流方向的不确定性增加了系统无功优化的维数,导致系统无功优化的收敛性、优化速度以及求解精度降低^[14-16]。

2 新能源场站接入的潮流计算模型

2.1 PCC 节点模型的建立

新能源场站内部负荷与传统配电网相同,因而在研究新能源场站并入配电网的总体特性时,本文不对新能源场站的内部组成部件展开详细的描述。新能源微电网可视为一种具有电源特性的负荷。由于新能源并网运行主要基于 P/Q 控制策略进行并网,因此将其当做一个由静态器件和电机部件构成的整体^[17,18]。在给定有功功率和无功功率的情况下,整个微电网可以被当做一个 PQ 节点,PCC 节点模型为

$$P_m = \begin{cases} -P_{PCC}, P_{cmd} \leq P_{max} \\ P_{PCC}, P_{cmd} \geq P_{max} \end{cases} \quad (1)$$

$$Q_m = \begin{cases} -Q_{PCC}, Q_{cmd} \leq Q_{max} \\ Q_{PCC}, Q_{cmd} \geq Q_{max} \end{cases}$$

式中: $P_m, P_{cmd}, P_{PCC}, P_{max}$ 分别为微电网吸收、P/Q 控制即时给定、PCC 节点输出以及微电网最大输出的有功功率; $Q_m, Q_{cmd}, Q_{PCC}, Q_{max}$ 分别为微电网吸收、P/Q 控制即时给定、PCC 节点输出以及微电网最大输出的无功功率。

2.2 配电网潮流计算

对于接入新能源场站的区域配电网,其潮流计算与传统配电网有所不同,原有的单向潮流转变为潮流方向不确定的多源弱环路网络^[19,20]。因此,本文通过式(1)所示模型,将配电网与微网的面对面关系转变为点对点关系。基于面向支路的前推回代法计算和处理 PQ 节点,并将分支路径的参数作为迭代变量,以规避雅可比矩阵复杂计算过程^[21]。该方法具有数值稳定性好、存储量小、收敛速度快的优点,且克服了配电网 R/X 比的限制。

图 1 为辐射状配电网的基本架构。

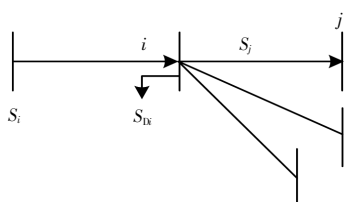


图 1 辐射状配电网基本架构

Fig.1 Basic architecture of radial distribution network

建立式(2)所示模型:

$$\begin{cases} P_i^{k+1} = P_{Di}^k + (P_{Li}^{k+1}) + \sum_{j \in C_i} P_j^{k+1} \\ Q_i^{k+1} = Q_{Di}^k + (Q_{Li}^{k+1}) + \sum_{j \in C_i} Q_j^{k+1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_i 为支路 i 的子支路的集合; P_i, P_{Li}, P_{Di} 分别为支路 i 的首端有功功率、线路有功损耗、负荷有功损耗; Q_{Li}, Q_{Di} 分别为支路 i 的线路无功损耗、负荷无功损耗; P_j 为支路 j 的首端有功功率; k 为迭代次数。

$$\begin{cases} (P_{Li}^{k+1}) = R_j \frac{\left(\sum_{j \in C_i} P_j^{k+1} + P_{Di}^k \right)^2 + \left(\sum_{j \in C_i} Q_j^{k+1} + Q_{Di}^k \right)^2}{(V_j^k)^2} \\ (Q_{Li}^{k+1}) = X_j \frac{\left(\sum_{j \in C_i} P_j^{k+1} + P_{Di}^k \right)^2 + \left(\sum_{j \in C_i} Q_j^{k+1} + Q_{Di}^k \right)^2}{(V_j^k)^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_j 为支路 j 的等效电阻; X_j 为支路 j 的等效电抗; V_j 为支路 j 的节点电压幅值。

电压相量可表示为

$$V_j^{k+1} = V_i^{k+1} - \frac{P_j^{k+1} R_j + Q_j^{k+1} X_j}{V_i^{k+1}} - j \frac{P_j^{k+1} X_j + Q_j^{k+1} R_j}{V_i^{k+1}} \quad (4)$$

电压幅值的计算式为

$$(V_j^{k+1})^2 = (V_i^{k+1})^2 - 2(P_j^{k+1} R_j + Q_j^{k+1} X_j) + \frac{(P_j^{k+1})^2 + (Q_j^{k+1})^2}{(V_i^{k+1})^2} + (R_j^2 + X_j^2) \quad (5)$$

本文面向支路的前推回代法的计算步骤如下。

步骤①:数据初始化,将迭代次数 k 置为 0,设定网络根节点的电压,同时给定其余各节点电压的初值,包括幅值和相角。

步骤②:在考虑负荷电压静态特性的基础上,完成对各子节点负荷数据的计算。

步骤③:以负荷节点为出发点,在沿子支路至父支路的方向上,利用式(2)计算各节点的功率分布情况,直至根节点。

步骤④:以根节点为出发点,在沿父支路至子

支路的方向上,利用式(5)计算各节点的电压分布情况,直至负荷节点。

步骤⑤:根据各节点的电压误差情况判断是否满足收敛条件。若满足收敛条件,则停止迭代计算,输出相关数据;反之,则令 $k=k+1$,利用上次迭代数据参与新一轮前推回代计算,直至满足收敛条件。

3 无功补偿配置

对于含新能源接入的配电网无功规划,主要集中在变电站无功补偿装置的配置上,故本节对变电站电容器的补偿容量和分组配置展开研究。

3.1 电容补偿容量配置

无功补偿的容量主要用于主变压器、负荷以及微电网中的无功损耗,变压器无功损耗 ΔQ 可表示为^[22]

$$\Delta Q=I_0\%S_N\times 10^{-2}+\beta^2U_k\%S_N\times 10^{-2} \quad (6)$$

式中: $I_0\%$ 为空载电流; S_N 为变压器的额定容量; $U_k\%$ 为短路阻抗电压; β 为变压器的负载系数。

负荷无功损耗可表示为

$$Q_l=P(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2) \quad (7)$$

式中: P 为负荷最大预测值; φ_1 为补偿前功率因数; φ_2 为补偿后功率因数。

微电网无功配置容量 Q_m 可表示为

$$Q_m=\sum_{i=1}^n Q_{mi} \quad (8)$$

式中: Q_{mi} 为配电网辖区内各微电网无功补偿配置的容量。

变电站电容器组补偿的容量 Q_c 为

$$Q_c=\Delta Q+Q_l-\eta\mu Q_m \quad (9)$$

式中: η 为微电网的波动系数; μ 为微电网在配电网中的渗透率。

3.2 电容器分组配置

考虑无功补偿的效果以及经济性,对无功补偿容量 Q_w 进行 n 组均等分配:

$$Q_w=Q_c/n \quad (10)$$

考虑无功补偿量对母线电压变化的影响,最大补偿容量须满足:

$$Q_1=25\%S_d \quad (11)$$

式中: S_d 为节点短路容量。

考虑谐波对分组电容器的影响,电压、电流校验须满足:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{U_{C1}+\sum_{i=3,5,7} U_{Ci}}{U_{CN}} &\leq 1.1 \sqrt{\frac{I_{CN}^2+\sum_{i=3,5,7} I_{Ci}^2}{I_{CN}^2}} \\ \frac{U_{C1}^2+\sum_{i=3,5,7} iU_{Ci}^2}{U_{CN}^2} &\leq 1.35 \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式中: U_{C1}, U_{CN}, U_{Ci} 分别为电容器的实测电压值、额定电压值、谐波电压值; i 为谐波次数; I_{CN}, I_{Ci} 分别为电容器的额定电流值、谐波电流值。

涌流校验须满足:

$$\left\{ \begin{aligned} I_y^* &= \frac{1}{\sqrt{K}} \left(1 - \beta \frac{Q_0}{Q} \right) + 1 \\ \beta &= 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Q}{KS_d}}} \\ Q &= Q_0 + Q' \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中: I_y^* 为涌流峰值的标么值; K 为电抗率; Q 为电容器组总容量; Q_0, Q' 分别为已投入、运行中的电容器组容量。

电容器单组容量须大于:

$$Q_{Cmin}=0.5\%S_d \quad (14)$$

4 算例验证

以某变电站为例,对本文所提含新能源场站的变电站无功配置策略进行验证。表1、表2分别为该变电站的辖区负荷情况、主变压器参数。

表1 某变电站辖区负荷情况

Table 1 The load situation of a substation area MW

年份	110 kV 以下负荷	年份	110 kV 以下负荷
2014	23.79	2019	67.16
2015	26.39	2020	73.21
2016	43.73	2021	78.36
2017	51.68	2022	86.04
2018	58.92	2023	92.13

表2 某变电站主变压器基本参数

Table 2 Basic parameters of the main transformer in a substation

参数	数值
单台容量/MVar	63
电压等级/kV	110/20
空载电流 $I_0\%$	0.48
短路阻抗电压 $U_k\%$	10.5
β	0.73

将表2所列电气参数代入式(6),计算得到

$\Delta Q=3.818$ Mvar。将该变电站辖区的最大负荷 92.13 MVA 平均分配于两台主变压器上,各主变压器负载率约为 0.73,代入式(7)计算得到 $Q_1=7.1695$ Mvar。单台主变压器需要电容器补偿的容量 $Q_c=10.9875$ Mvar,故至少须要配置 11 Mvar 的电容器补偿装置。已知该变电站的节点短路容量 $S_d=385.29$ MVA,代入式(11)计算得到单组最大补偿容量 $Q_i=9.63$ Mvar,单组最小补偿容量为 1.93 Mvar。所以将变电站 11 Mvar 无功补偿容量平均分为 3 组,每组容量为 3.7 Mvar,计算得到阻抗 $X_c=36.03 \Omega$ 。

将电容器的阻抗带入校验公式:

$$\begin{aligned} & \frac{X_c}{3} \times 8.62 \times \frac{3 \times 1.189}{3 \times 1.189 - 0.153 X_c} + \\ & \frac{X_c}{5} \times 60.34 \times \frac{5 \times 1.189}{5 \times 1.189 + 0.1 X_c} + \\ & \frac{X_c}{7} \times 43.1 \times \frac{7 \times 1.189}{7 \times 1.189 + 0.28 X_c} \leq 1270 \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{X_c}{12701} \times 8.62 \times \frac{3 \times 1.189}{3 \times 1.189 - 0.153 X_c} \right)^2 + \\ & \left(\frac{X_c}{12701} \times 60.34 \times \frac{5 \times 1.189}{5 \times 1.189 + 0.1 X_c} \right)^2 + \\ & \left(\frac{X_c}{12701} \times 43.1 \times \frac{7 \times 1.189}{7 \times 1.189 + 0.28 X_c} \right)^2 \leq 0.69 \quad (16) \\ & 3 \times \left(\frac{X_c}{3} \times 8.62 \times \frac{3 \times 1.189}{3 \times 1.189 - 0.153 X_c} \right)^2 + \\ & 5 \times \left(\frac{X_c}{5} \times 60.34 \times \frac{5 \times 1.189}{5 \times 1.189 + 0.1 X_c} \right)^2 + \\ & 7 \times \left(\frac{X_c}{7} \times 43.1 \times \frac{7 \times 1.189}{7 \times 1.189 + 0.28 X_c} \right)^2 \leq 56466666.67 \quad (17) \end{aligned}$$

经式(15)~(17)验证,电容器配置能够满足要求。

5 结束语

本文根据电网的基本架构分析了新能源接入对潮流特性的影响,将新能源电网看作静态器件和电机部件构成的整体,搭建新能源场站接入地区电网的 PCC 节点模型。基于面向支路前推回代法对配电网展开潮流计算,并对电容器的容量及分组进行配置,优化无功补偿。最终,通过案例验证了所提方法的可行性。

参考文献:

- [1] 摆世彬,张金龙,鲍颜红,等.计及新能源消纳的关联断面极限功率在线计算方法[J].电网技术,2020,44(10):3717-3724.
- [2] 赵真,袁旭峰,熊炜,等.基于柔性互联配电网的概率潮流算法综述[J].电力科学与工程,2020,36(6):17-23.
- [3] Bhushan S M,Sudhakaran M. Time-series quasi-dynamic load flow analysis with seasonal load variation to resolve energy nexus for a practical distribution network in Puducherry smart grid system incorporating harmonic analysis and mitigation [J]. Energy Nexus, 2023.DOI:10.1016/j.nexus.2023.100234.
- [4] Brodzicki M,Klucznik J,Czapp S.Polish naval academy researcher yields new study findings on electronics (evaluation of VSC impact on power system using adequate P-Q capability curve)[J].Electronics Newsweekly,2023(20):246-247.
- [5] 赵吉祥,李丹,廖攀峰,等.基于无功超调率指标的变电站无功优化配置[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(1):45-51.
- [6] 姚琪,纳燕钊,苏川,等.微网并入配网的双向灵敏度潮流置信评估算法[J].宁夏电力,2022(3):41-47.
- [7] 王云会,郑强仁,郭森,等.分布式电源接入配电网的控制策略及消纳能力评估研究[J].电器与能效管理技术,2022(4):83-87.
- [8] 张磊.基于电压监测系统的配电网无功优化研究[D].北京:华北电力大学,2014.
- [9] Ali S,Salah K,Francisco J,et al. A comprehensive modeling for wind turbine generator and DSTATCOM into backward/forward load flow algorithm [J].Electric Power Components and Systems,2022,50(11/15):788-799.
- [10] Wei M,Wei W,Zhe C,et al. Voltage regulation methods for active distribution networks considering the reactive power optimization of substations [J]. Applied Energy, 2021,284(15):116347.
- [11] 张豪.大电网无功电压配合调控的方法与策略研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [12] Murat C,Nacar N C. Optimum allocation of multiple type and number of DG units based on IEEE 123-bus unbalanced multi-phase power distribution system [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2023,144:108564.
- [13] 于惠钧,马凡烁,陈刚,等.基于改进灰狼优化算法的含光伏配电网动态无功优化[J].电气技术,2024,25(4):

- 7-15, 58.
- [14] 方鑫,袁晓冬,杨景刚,等.基于时间序列与耦合分析的区域综合能源系统多能潮流计算方法[J].电力需求侧管理,2023,25(5):59-64.
- [15] 张君则.基于出力特性的分布式电源优化配置与运行[J].电气技术,2022,23(8):36-40.
- [16] 李阳,张启亮,李开灿,等.计及主动需求响应的配电网有功无功鲁棒优化调度[J].山东电力技术,2024,51(1):35-44.
- [17] 邓笑冬,周野,李娟,等.考虑电力交换的区域电网新能源承载能力测算方法[J].电力勘测设计,2022(11):1-5,46.
- [18] 王丹枫,刘素梅,郑燃,等.新能源场站高比例接入下主流类型工频量距离保护比对[J].可再生能源,2024,42(5):655-663.
- [19] 吴卫良.基于动态无功补偿装置优化配置和分区的电压稳定研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- [20] 郭杉,杜波,安东,等.计及电压不可行分区的配电网无功规划方法[J].山东电力技术,2023,50(2):19-25.
- [21] 钱进宝,刘晓光,蔡玺,等.基于自适应学习率卷积神经网络的新型配电网源网荷储无功协调优化技术[J].可再生能源,2024,42(2):411-419.
- [22] 林建熙.多级电网无功电压调控失配的机理及其博弈[D].广州:华南理工大学,2012.

Reactive power optimization of substations containing new energy stations

Zhang Dawei¹, Mei Jin¹, Wang Yanfeng¹, Ma Ruiguang², Wu Guannan³

(1.State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610095, China; 2.State Grid Sichuan Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Chengdu 610095, China; 3.Department of Electrical Engineering and Applied Electronics Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the large-scale access of new energy into the power grid, traditional power flow calculation can no longer meet the needs of the distribution network, and the effectiveness of reactive power allocation of the distribution network is reduced, thus affecting the safety and stability of the entire distribution network. Therefore, this paper analyzes the influence characteristics of power flow in substations including new energy stations, establishes the PCC node model of new energy stations connected to the regional power grid, and uses the branch forward push-back method as the power flow calculation method of distribution network. The characteristics of reactive power compensation in substation with new energy station access are analyzed, and the reactive power compensation capacitors are planned based on equal quantity grouping. Finally, taking a substation as an example, the feasibility of the proposed calculation method is verified, which fully proves the effectiveness of the proposed calculation method.

Keywords: new energy stations; power flow calculation; reactive power compensation; load forecasting