

[云边协同]

基于云边协同策略的配电网无功电压控制

文/张效义¹ 金秀娟²

1. 浪潮软件集团有限公司; 2. 中国中建设计研究院有限公司城乡设计与发展分公司

随着配电网规模的逐步扩大, 配电网无功电压问题越来越严重, 引发输电线路损耗上升, 严重影响配电网供电质量。针对配电网无功电压集中控制响应速度慢, 整体协调控制难度大的问题, 基于边缘计算技术提出一种新型的配电网无功电压控制策略, 并通过仿真算例验证该方法的有效性和可行性。

配电网无功电压是对配电网电能质量进行评价的一项关键指标。对配电网的无功电压进行科学、有效的优化, 是实现配电网电能质量提高, 实现配电网运行经济性的重要手段。因此在配电网的无功功率优化方面, 以及配电网电压与配电网无功功率协调控制方面展开更为深入的研究与分析具有重要意义。本文基于云边协同控制策略的无功电压控制方法, 将边缘计算和云边协同进行有效的融合, 通过配置在云端和边端的控制中心实现对变压器和电容器的操作, 从而实现配电网无功功率的整体平衡控制。

配电网无功优化

配电网无功优化必须保证电网安全运行, 实时进行无功功率的平衡控制, 以降低无功功率的损耗, 保证电网经济性的提升, 并有效提升电压质量。配电网无功功率调节普遍采用两种方法实现, 分别是调节变压器的分接头和控制无功补偿设备的投切, 这样就能够对配电网的无功功率进行补偿, 从而保证无功功率维持在较合理的水平。配电网无功补偿实现方式如图1所示。

图1中, U_A 为节点A位置的电压值, U_B 为节点B位置的电压值, Q_C 为参与无功补偿操作的投切电容

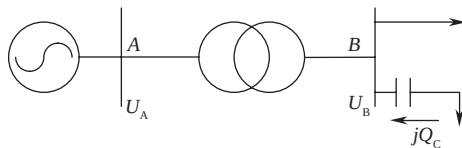


图1 配电网无功补偿实现方式

器的容值, 经过无功补偿操作后, 无功功率和节点电压需要满足如下关系

$$U_A^2 = \left\{ U_B + \left[Q_A R_{AB} + (Q_B - Q_C) X_{AB} \right] / U_B \right\}^2 + \left\{ \left[Q_A X_{AB} - (Q_B - Q_C) R_{AB} \right] / U_B \right\}^2 \quad (1)$$

对式(1)进行求解运算, 则解出参与无功补偿操作的投切电容器的容值, 该值为正说明呈现容性, 需要进行感性补偿, 该值为负说明呈现感性, 需要进行容性补偿, Q_B 为节点B位置的电容值, Q_A 为节点A位置的无功功率, R_{AB} 为节点AB之间线路等效电阻, X_{AB} 为节点AB之间线路等效电抗, 对配电网补偿无功功率 Q_C 后, 变压器二次侧电压, 即节点A处的电压为

$$U_A = U_B + \left[Q_A R_{AB} + (Q_B - Q_C) X_{AB} \right] / U_B \quad (2)$$

将式(2)进行处理, 则可以计算出节点A处的无功功率与变压器二次侧电压以及补偿功率 Q_C 之间的关系为

$$Q_A = \left[U_A U_B - U_B^2 - (Q_B - Q_C) X_{AB} \right] / R_{AB} \quad (3)$$

因此，通过在配电网的支线区域进行电容器投切或调节变压器线圈，来进行配电网无功功率的调节。如果一直不能够保证实现无功平衡控制，则通过云端控制中心继续进行优化，以实现云端和边端协调控制作用下，无功功率 Q_A 达到最优状态。

配电网无功电压云边协同架构

基于云边协同策略的配电网无功电压优化控制方法，能够对相关范围内的无功电压进行自动优化^[7]，自动优化的结果会传输到配电网的主控中心，边端控制中心就能够自主完成边缘支线的无功优化，同时将优化结果传输到云端控制中心，最后由云端控制中心从整体角度进行控制，完成整个配电网的整体优化。配电网无功电压云边协同控制架构可以划分为边端控制和云端控制两大部分，边端控制中心包括了边缘侧和设备端两个关键部分，云端控制中心能够对数据进行存储、在云端完成相关优化等任务。配电网无功电压云边协同架构如图2所示。

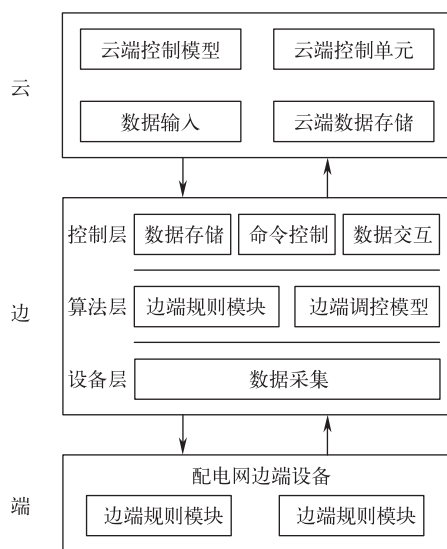


图2 配电网无功电压云边协同架构

云端控制中心的数据传输通过数据交互模块实现，云端控制中心能够完成配电网无功功率的整体协调优化，并将最终优化方案与优化结果进行保留，其中关键信息会保存在云端存储模块，其他数据会分配到边端节点完成处理与运算。这样就能够保证云端控制中心的数据处理和数据存储压力维持在较低的水平，同时也会最大限度降低通信传输延

迟产生的不良影响，边端控制中心能够就地进行配电网的无功优化。设备层负责进行数据采集、功率监测和设备动作等任务；算法层主要负责进行无功优化方面的运算；控制层主要负责进行命令控制、数据存储和数据通信等任务；设备端的关键部件是变压器和电容器，通过协调控制进行无功优化，以实现配电网的无功平衡。

配电网无功电压云边协同控制策略

1. 配电网边端控制中心

配电网支线能够实现边端控制功能，当配电网的无功处于不平衡状态时，边端控制中心的调节功能会被触发，自主进行无功调节，完成无功的优化，并将结果上传到云端控制中心。

配电网中的电压传感器和电流传感器完成数据采集，上传到控制单元完成无功功率检测，监测数据导入到算法层进行无功功率极限判断，当无功功率超出极限范围，则进行电容器投切操作和变压器档位调节操作，保证无功功率控制在极限范围内；当无功功率不超出极限范围，则不进行操作。

调控模型作为边端控制中心的核心部分，负责对无功功率进行检测和控制。历史数据导入到模型内根据最优无功算法进行训练，提取出最优的无功功率，并将该结果传输到配电网的算法模型中进行迭代运算，最终得到最优的边端无功功率电压、电流值，由电压、电流值确定电容器投切和变压器档位调节的大小，由设备层进行电容器投切或变压器的线圈档位调节，从而完成无功功率的平衡控制。

2. 配电网云端控制中心

配电网的边端控制中心控制对应的设备来调节电压、电流，来完成配电网的无功功率的优化，实现对无功电压的调节。边端控制中心与云端控制中心之间能够进行数据互发，当云端控制中心发现当前并网位置无功功率不能够匹配配电网整体的无功功率平衡时，就转为云端无功优化控制，通过控制变压器线圈档位和电容器的投切容量来进行整体的无功平衡调节。

当检测到并网位置的无功功率处于非最优状态时，云端控制中心会对源自于边端控制中心的数据进行计算，根据母线位置无功功率平衡的要求得到边缘节点的电压、电流数据。云端控制中心将计算

得到的电压、电流数据传输到各个边端控制中心的设备端，由各个边端控制中心实现无功功率的优化，同时云端调节也受到边端调节的限制，必须保证全部边缘节点无功功率最佳状态才可以进行。边缘节点每进行一次调节，数据就再进行一次数据采集，继续进行计算调节，直到配电网母线处于无功功率平衡的最优状态，从而实现云边协同控制。

当配电网并网位置的无功功率处于最优状态，并且配电网总体处于无功平衡状态，不进行调节，同时接收并存储源自于边端控制中心的无功数据。这样便通过云边协同控制实现了无功电压的集中控制和分布式控制。

算例分析

以某电网为例，对基于云边协同策略的配电网无功电压控制策略进行研究，在MATLAB/Simulink仿真环境下搭建模型。

在模型中将处于最优状态的无功功率与检测到的母线、支线的无功功率进行对比分析，如果无功功率不在最优范围内则操作电容器投切或调节变压器的线圈档位，以调节母线和支线的无功功率达到最优。

边端模型中，将最小的无功率作为最优无功功率，计算得到调节结果见表1、表2。

表1 边端计算调节结果

项点		支路1	支路2	支路3	支路4
调节前	电压/V	238.19	235.91	231.13	233.89
	电流/A	93.61	74.21	73.18	86.64
	功率因数	0.85	0.87	0.82	0.86
	无功功率/Var	10357	8893	9897	6351
调节后	电压/V	223.81	222.51	223.97	224.16
	电流/A	52.98	51.89	44.37	45.19
	功率因数	0.999	0.997	0.998	0.998
	无功功率/Var	492	497	496	496

表2 边端计算变压器档位调节结果

支路	电压/V	电流/A	变压器档位	电容投切 (%)
1	223.81	52.98	3	15%
2	222.51	51.89	3	15%
3	223.97	44.37	3	10%
4	224.16	45.19	4	10%

云端模型中，检测母线处的无功功率，如果检测到无功功率整体平衡，则不进行调节；如果检测到无功功率不平衡，则进行调节，边缘节点在自身无功功率最优区间内调节，直到云端检测到无功功

率达到最优值，调节结果见表3。

表3 云端协同调节结果

调节前		调节后				
母线		母线	边缘节点	无功功率	变压器档位	电容器投切 (%)
电压/V	1 023.18	912.21	支路1	481.33	4	15
电流/A	69.24	56.31	支路2	495.12	3	15
功率因数	0.75	0.96	支路3	497.31	3	15
无功功率/Var	38 195	14 437	支路4	492.17	4	10

结束语

本文提出一种基于云边协同策略的配电网无功电压控制策略，该策略融合边缘计算技术和云边协同技术，能够有效实现对配电网无功电压的协调控制问题，实现配电网无功电压的分布式控制，降低配电网的无功损耗，有效提高配电网的稳定性、可靠性和经济性，可以进行大规模的推广应用。EA

(收稿日期：2024-12-16)

参考文献

[1] 王育飞, 陈强, 郑云平, 等. 基于动态无功电压灵敏度的有源配电网移动式储能优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 29-35+59.

[2] 陈志华, 柯强, 胡经纬, 等. 含分布式光伏的有源配电网无功电压控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(2): 16-24.

[3] 黄大为, 王孝泉, 于娜, 等. 计及光伏出力不确定性的配电网混合时间尺度无功/电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4377-4389.

[4] 赵平, 赵期期, 艾小猛. 考虑极限场景的主动配电网重构与无功电压调整联合鲁棒优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S02): 496-506.

[5] 王文宾, 靳伟, 李洪涛, 等. 考虑光伏集群无功贡献的配电网无功电压优化调节方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 114-123.

[6] 石博隆, 丁磊明, 杨晓雷, 等. 含分布式光伏的有源配电网无功电压控制研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(5): 82-87.

[7] 耿少博, 顾乔根, 常风然, 等. 交直流混合配电网分布式无功电压互动控制策略[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 26-33.