

主动配电网多级无功电压协调控制研究

王永全¹, 李振坤¹, 王永志²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 广东省电网公司东莞供电局, 广东东莞 523110)

Research on Multilevel Reactive Power and Voltage Control of Active Distribution Networks

WANG Yongquan¹, LI Zhenkun¹, WANG Yongzhi²

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Dongguan 523110, China)

摘 要: 分布式光伏大量接入配电网后电压越限问题成为影响电网安全稳定运行的关键因素。为了适应高渗透率、大规模分布式光伏的接入, 提高系统调压能力, 本文依据主动配电网内调压资源特性的不同, 对其进行了分类分级处理, 提出了主动配电网多级无功电压控制策略, 即分别利用小容量分布式光伏、光伏电站无功、传统 VQC 装置和光伏电站有功实现系统一、二、三、四级调压。其中, 针对小容量分布式光伏所采用的分散式就地控制策略, 提出了基于并网点电压和光伏实际有功出力的 $\cos\varphi(U, P)$ 控制模型。最后, 基于改进的 IEEE33 节点算例进行了仿真, 仿真结果表明本文所提出的四级调压策略, 充分利用了主动配电网内分散的调压资源, 有效减少了 VQC 装置动作次数, 并改善了配电网电压水平。

关键词: 主动配电网; 光伏逆变器; 无功电压控制; 分散式就地控制; 集中式协调控制

Abstract: With the access of large amount of distributed PVs to the distribution network, the overvoltage becomes the key factor that affects the operation security and stability of power grid. In order to adapt to the high permeability and large-scale access of distributed PVs to power grid, and to improve voltage regulating ability of system, a multilevel reactive power and voltage control strategy for active distribution network is proposed by classification according to the different characteristics of the voltage resources in the active distribution network. The proposed control strategy can achieve the first, second, third and fourth-level voltage regulation based on small-capacity distributed PV, reactive power of PV, traditional VQC device and active power of PV. The decentralized local control strategy is applied to control small-capacity distributed PV, by which the control

model of $\cos\varphi(U, P)$ is proposed based on voltage and PV active power output. In the end, taking the modified IEEE33-bus system as example, the simulation result shows that the proposed four-level voltage regulation strategy makes full use of distributed voltage resources in the active distribution network, action times of the VQC device is reduced effectively, and the voltage level of network is improved.

Keywords: active distribution network; photovoltaic inverter; reactive power and voltage control; decentralized local control; centralized coordination control

0 引 言

分布式电源(distribution generation, DG)的接入改变了原有配电网的运行方式, 传统的调压方式难以满足电网电压运行要求。为适应高渗透率 DG 接入, 保证系统电压质量, 主动配电网(active distribution network, ADN)无功电压控制技术成为一种重要手段。

针对分布式电源大量接入引起的过电压现象已有很多学者进行了深入研究。文献 [1] 通过对并网 DG 位置、容量的合理规划, 以提高分布式电源渗透率; 文献 [2] 通过调整变压器分接头以应对由 DG 接入引起的电压波动, 但 DG 波动频繁且迅速, 单纯依靠变压器分接头调压能力受限。为此很多研究提出通过对网络调压资源进行集中协调优化, 以应对依靠传统调压装置不足的问题^[3-9]。文献 [3] 考虑不同分布式电源类型的特点, 并结合传统调压手段——变压器分接头和无功补偿设备等实现无功电压集中协调控制。文献 [6] 通过对电网内的 DG、DSTATCOM、OLTC 和电容器组进行集中协调控制保证线路电压水平。文献 [7] 建

基金项目: 国家自然科学基金项目(51407113); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900)

立了主动配电网综合无功优化模型,考虑了电容器、变压器有载调压、分布式电源无功调节、配电网网络重构,同时计及各种无功优化策略对配电网的负面效应,在模型中加入各种优化策略的优先次序,在一定程度上减轻了系统综合调压压力。但如果网络内 DG 较多,这些措施将对系统协调能力有较高要求。为此文献 [8] 从集中控制和分散控制两个方面总结了主动配电网的无功电压控制方法,并指出主动配电网中需求侧管理和拓扑结构等因素对无功电压特性的影响。文献 [9] 将配电网分为自治控制区域和协调控制区域,实行自上而下的主动配电网电压分层协调控制策略,避免了集中控制运算维度大的问题。这些策略并未给出 DG 具体的控制策略。德国电气工程师协会针对并网光伏 (photovoltaic, PV) 无功电压控制问题提出 4 种逆变器无功控制策略:恒无功功率 Q 控制、恒功率因数 $\cos\varphi$ 控制、基于光伏有功出力的 $\cos\varphi(P)$ 控制以及基于并网点电压幅值的 $Q(U)$ 控制策略^[10-12]。文献 [13] 提出了根据并网点电压水平,分布式电源分别采用定功率因数控制模式和电压控制模式的就地控制策略。

本文对网内分布式光伏电源、光伏电站有功、无功出力、变压器分接头和电容器组等资源进行分类分级处理;并制定主动配电网无功电压控制策略,即多级调压策略:先利用小容量光伏实现对系统的一级调压管理,再分别通过调度光伏电站无功出力、调节 VQC 装置、削减光伏电站有功出力的方式实现系统的二、三、四级调压。其中一级调压模式为分散就地控制,提出了 $\cos\varphi(U, P)$ 就地控制策略,有效保证了每个光伏无功电压控制效果。通过采取本文的 4 级调压策略,可充分利用网络内现有资源,有效提高各类资源调压的效果和动作的合理性,减少 VQC 装置动作次数,增强系统对电网电压的管控能力,保证全网电压水平。

1 含 DG 的主动配电网电压控制

DG 的大量分散性接入,使得配电网潮流难以管控,并容易出现功率倒送,造成节点电压越限。单纯依靠 VQC 装置,远不能满足实际电网对运行电压的要求。因此需要结合网内各类调压资源进行综合控制。目前主动配电网无功电压控制技术主要包括两类:分散式就地控制和集中式协调控制。

1.1 分散式就地电压控制

分散式就地电压控制是指通过量测本地电气量信息,本地控制器根据既定的控制策略对系统进行响应。该方法的优点是不需要复杂的通信和控制系统,可靠性高,反应速度快;缺点是无法得知整条线路或者局部的潮流分布,无法保证全局最优。

大量的小容量分布式发电系统一般较为分散,不易调度,较难采取集中式协调控制模式,因此,此类 DG 的控制模式一般可通过控制 DG 控制器实现对本地节点电压的响应。

1.2 集中式协调电压控制

主动配电网电压集中式协调控制系统是集主动配电网内所有控制装置动作情况为一体的一种高级配电管理系统。通过信息采集系统,将配电系统的信息收集,并上传至中央控制系统,由中央控制系统分析计算,输出系统当前电压优化控制方案,再由通信系统将动作指令下达至各设备控制器。可实现对系统内所有调压设备的优化调度,使得调压设备动作获得最优的组合,实现全局范围最优。但集中式协调控制需要较强的通信、信息采集、监测和处理系统,任一环节出现故障均可能导致调压失败,并且时效性较差,因此需要管控的设备不宜过多。

传统 VQC 装置的控制模式一般采用基于九区图策略的就地控制方法,但考虑到 DG 接入改变了电网潮流分布,导致流经变电站母线的功率值降低甚至出现功率倒送,造成母线处检测到的功率因数偏低,引起 VQC 装置误动,因此 VQC 装置宜采用集中式协调控制模式。光伏电站分布相对比较集中,且其有功、无功容量均较大,故可以对光伏电站进行集中式协调控制,并且调动更多的 DG 参与系统运行也是 ADN 调压的核心手段。

2 分布式光伏 $\cos\varphi(U, P)$ 就地无功电压控制模型

目前分布式光伏的无功电压控制策略主要有 4 种:恒无功功率 Q 控制;恒功率因数 $\cos\varphi$ 控制;基于并网点电压幅值的 $Q(U)$ 控制策略;基于光伏有功出力的 $\cos\varphi(P)$ 控制^[10]。其中恒无功功率 Q 控制指光伏维持恒定不变无功功率运行,此控制策略普适性较差。恒功率因数 $\cos\varphi$ 控制指光伏按照设定的功率因数接入运行,一般设定 $\cos\varphi = 0.95$ 或 0.98,此控制策略难以保证无功投入效果。基

于并网点电压幅值的 $Q(U)$ 控制策略指光伏无功输出值仅根据光伏的并网点电压变化, 虽然保证了无功投入效果但可能出现光伏容量越限, 或者并网功率因数不合格的结果。本文基于传统的光伏有功出力的 $\cos\varphi(P)$ 控制模型提出了 $\cos\varphi(U, P)$ 控制模型。

2.1 传统的分布式电源 $\cos\varphi(P)$ 控制模型

基于光伏有功出力的 $\cos\varphi(P)$ 控制, 指功率因数的取值与光伏电源有功功率相关, 控制曲线如图 1 所示, 在光伏出力较小时, 光伏以较大的功率因数值运行; 随着光伏有功出力的增大, 对电压影响增强, 下调功率因数值, 吸收一定量的无功功率, 以削减光伏有功出力对电压的抬升幅度; 当光伏出力增大到一定值时, 光伏按预定的最小功率因数值运行, 即尽最大能力调压。

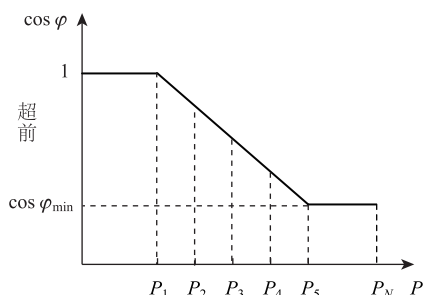


图1 $\cos\varphi(P)$ 控制策略曲线

该控制策略的适用性得到了一定提高, 但该控制策略没有考虑并网点电压信息, 在光伏出力和负荷均较大, 电压并未出现越限, 采用该控制策略可能会破坏电网电压水平。

2.2 分布式光伏 $\cos\varphi(U, P)$ 控制模型

分布式光伏接入配电网后, 处于同一时刻位于不同位置的光伏、处于不同时刻位于同一位置的光伏均采用相同的控制曲线, 显然缺乏普适性, 并且 $\cos\varphi(P)$ 控制策略仅考虑了光伏吸收无功降压能力, 未考虑光伏功率因数滞后运行对电压的抬升作用。因此, 本文提出了使 $\cos\varphi(P)$ 控制曲线中功率因数下限值可根据并网点电压幅值自适应变化, 进而实现基于光伏并网点电压和光伏有功出力联合控制的 $\cos\varphi(U, P)$ 控制策略。该控制策略包括 3 类情景: 光伏功率因数滞后运行、光伏功率因数超前运行, 光伏按单位功率因数运行。如图 2 所示: ①在并网点电压偏低时(即 $U_1 \leq U \leq U_2$) 光伏逆变器运行在功率因数滞后模式, 此时功率因数下限值随电压升高而增大, 即减小光伏无功最大输出量, 降低对系统

电压的抬升能力; 在电压越下限时功率因数运行在既定的最小值; ②在并网点电压偏高时(即 $U_3 \leq U \leq U_4$) 光伏逆变器运行在功率因数超前模式, 此时功率因数下限值随着电压的升高而降低, 即增大光伏无功最大吸收量, 提高其对系统电压抑制能力; 在电压越上限时功率因数运行在既定的最小值; ③在并网点处于较优状态时(即 $U_2 \leq U \leq U_3$) 光伏逆变器运行在单位功率因数模式, 即功率因数下限值为 1。

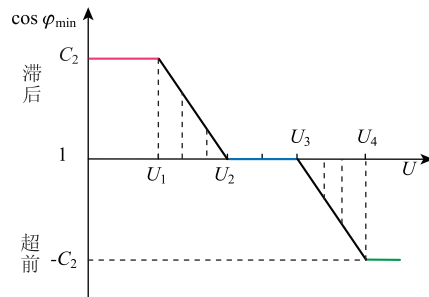


图2 $\cos\varphi_{\min}(U)$ 随电压 U 变化曲线

图 2 中为根据电压 U 计算 $\cos\varphi_{\min}$, 其中 C_2 为光伏逆变器所允许的最小功率因数值。 $\cos\varphi_{\min}(U)$ 的数学表达式见公式(1)。

$$\cos\varphi_{\min} = \begin{cases} C_2 & U \leq U_1 \\ 1 + \frac{1-C_2}{U_2-U_1}(U-U_1) & U_1 < U < U_2 \\ 1 & U_2 \leq U \leq U_3 \\ 1 - \frac{1+C_2}{U_4-U_3}(U-U_3) & U_3 < U < U_4 \\ -C_2 & U \geq U_4 \end{cases} \quad (1)$$

由图 2 可知, 根据并网点电压确定光伏逆变器运行模式后, 可确定该并网点电压水平下的功率因数下限值, 进而可确定如图 3 所示 $\cos\varphi(P)$ 曲线簇中具体的曲线。电压水平较低时, 即图 3 中 X 轴上半部分, 光伏功率因数随着光伏有功出力的增大而增大, 降低无功输出值, 避免过补偿; 在电压水

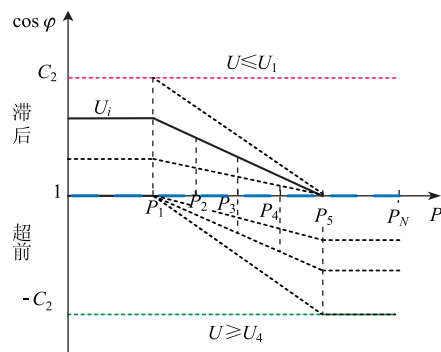


图3 $\cos\varphi(P)$ 控制策略曲线簇

平较高时,即图 3 中 X 轴下半部分,光伏功率因数随着光伏有功出力的增加而降低,提高无功吸收值,削减有功对电压的抬升;电压越限时,光伏逆变器功率因数均运行在最小值,尽最大能力调压;电压较优时,光伏逆变器按单位功率因数运行,不调压。

由图 3 根据光伏有功出力 P 的变化,确定光伏具体的运行功率因数 $\cos\varphi$, 数学表达式如(2)、(3):

$$\cos\varphi_{\text{滞后}} = \begin{cases} \cos\varphi_{\min} & P \leq P_1 \\ 1 + \frac{1 - \cos\varphi_{\min}}{P_5 - P_1} (P - P_1) & P_1 < P < P_5 \\ 1 & P_5 \leq P \end{cases} \quad (2)$$

$$\cos\varphi_{\text{超前}} = \begin{cases} 1 & P \leq P_1 \\ -1 + \frac{1 + \cos\varphi_{\min}}{P_5 - P_1} (P - P_1) & P_1 < P < P_5 \\ \cos\varphi_{\min} & P_5 \leq P \end{cases} \quad (3)$$

公式(1)、(2)、(3),三组公式联合构成了完整的 $\cos\varphi(U, P)$ 控制策略。该控制策略有效区别了不同并网点电压和不同有功出力水平下光伏的无功补偿幅度,有效改善光伏调压效果,并实现光伏无功出力的实时快速响应。

3 主动配电网四级无功电压控制策略

3.1 四级调压控制策略

本文首先根据网内调压资源特性将其进行分类,并在综合电压控制中对其进行分级控制。具体分为:小容量分布式光伏电源为一级调压手段,光伏电站无功出力为二级调压手段,传统 VQC 设备作为三级调压手段,光伏电站有功出力为四级调压手段。

一级调压:用户接入的小型分布式光伏较为分散,不易集中控制,可采用本文的 $\cos\varphi(U, P)$ 控制策略完成光伏的分散式电压调节任务。调压范围是分布式光伏本地或临近节点。

二级调压:由于小型光伏容量较小,参与调压能力有限,无法保证各时段全网电压水平,此时需协调控制网络内光伏电站无功出力。光伏电站一般容量较大,且根据《光伏发电系统接入配电网技术规定》^[14]光伏电站并网功率因数值比小型光伏并网功率因数值低,故光伏电站有较强的无功调节能力。通过二级调压可以很好地改善整个系统电压水平,并较大程度减少系统无功流动。选取光伏电站作为二级调压手段原因有:①变压器分接头和电容器组的频繁动作会损耗设备的使用寿命,需尽可能减少其动作次数;②减少对光伏有功调度,提高清

洁能源发电比重是主动配网目标之一。

三级调压:在某些光伏出力较大或者负荷过重时刻,单纯依靠网络内的光伏调控全网电压无法满足电压质量要求。因此需要在一、二级调压效果不理想时,通过协调控制变压器分接头档位和电容器投切组数对系统进行第三次调压。

四级调压:考虑在极端情况下一、二、三级调压均无法保证全网电压水平合格,而配电网线路 R/X 较大,有功功率对电压变化有较大影响,为了保证用户对电压质量的需求和系统的安全稳定运行,中央调度控制系统将对系统内的光伏电站有功出力进行管控,甚至允许其退出运行。

3.2 多级调压控制的数学模型

3.2.1 目标函数

在多级电压控制中,依据调压资源特性和成本的不同,本文采用了不同的优化目标。一级调压设备为小容量光伏电源,由光伏逆变器就地控制,无需中央控制系统控制。二、三级调压目标函数设为系统节点电压最优,四级调压将电压合格作为约束条件,目标函数设为光伏有功削减量最小:

$$\min f = \sum_{i=1}^N |U_i - U_{i,\text{ref}}| \quad (4)$$

式中: U_i 、 $U_{i,\text{ref}}$ 分别为各节点电压与各节点电压期望值; N 是系统总节点数。

$$\min f = \sum_{i=1}^n |P_{i,\text{pvloss}}| \quad (5)$$

式中: $P_{i,\text{pvloss}}$ 为光伏电站 i 有功出力削减量; n 为光伏电站接入数。

3.2.2 约束条件

等式约束条件即功率平衡方程:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in h} U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in h} U_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_i 、 Q_i 表示节点 i 处注入的有功功率、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 表示节点 i 、 j 之间的电导、电纳和电压之间的相差角。

不等式约束条件分别为电压、变压器分接头档位、电容器组投切组数和光伏电站有功、无功出力约束:

$$\begin{cases} 0.95 \leq U_i \leq 1.05 \\ T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ P_{\text{pvmin}} \leq P_{\text{pvi}} \leq P_{\text{pvmax}} \\ Q_{\text{pvmin}} \leq Q_{\text{pvi}} \leq Q_{\text{pvmax}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{pv\max}$ 、 $P_{pv\min}$ 、 $Q_{pv\max}$ 、 $Q_{pv\min}$ 分别为光伏电站 i 有功、无功出力上下限; $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 为变压器分接头档位上下限; $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$ 为电容器投切组数上下限。

3.3 主动配电网综合电压控制仿真流程

在主动配电网无功电压控制的仿真过程中, 小容量分布式光伏采用 $\cos\varphi(U, P)$ 分散式就地控制策略, 根据并网点电压和当前有功出力确定自身无功出力, 并检测当前全网电压是否合格, 若合格则表明该级调压即可满足要求, 若不合格则需申请下一级调压直至实现全网电压合格, 具体流程如图 4、5 所示。

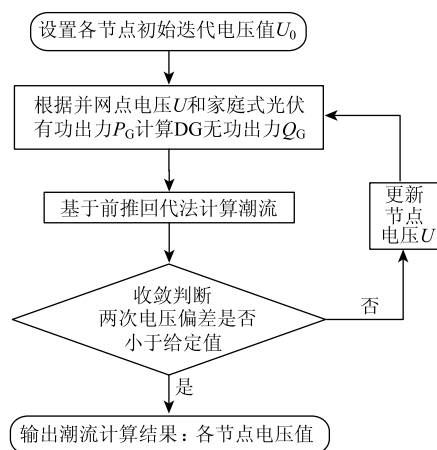


图4 一级调压潮流计算流程图

4 算例与分析

本文基于改进后 IEEE33 节点配电网系统进行仿真, 本算例计及变压器分接头、电容器和小容量光伏和光伏电站, 配电网结构如图 6 所示。110/10kV 有载调压变压器型号为 SFZ9-6300/110, 电压调节范围为 $110 \pm 8 \times 1.25\%$; 并联补偿电容器组共 8 组, 每组容量为 100kvar; 3 个小容量光伏, 分别接入节点 18、23、33; 2 个光伏电站容量为 1424.88kW, 分别接于节点 10、27。系统内光伏总的最大有功出力为 4749.6kW; 系统最大有功负荷为 3302.97kW, 负荷和光伏总的日出力曲线如图 7 所示; 假设高压母线电压恒定为 110kV, 仿真初始时刻分接头位置为 +2 档位 (10.25kV), 并联补偿电容器组投切初始状态为 0 组。控制策略中分别取 $U_1 = 0.95$ 、 $U_2 = 0.98$ 、 $U_3 = 1.02$ 、 $U_4 = 1.05$ 。在二、三、四级调压寻优算法采用遗传算法求解^[3], 编码方式采用二进制, 交叉概率设为 0.8, 变异概率设为 0.1, 种群规模为 50,

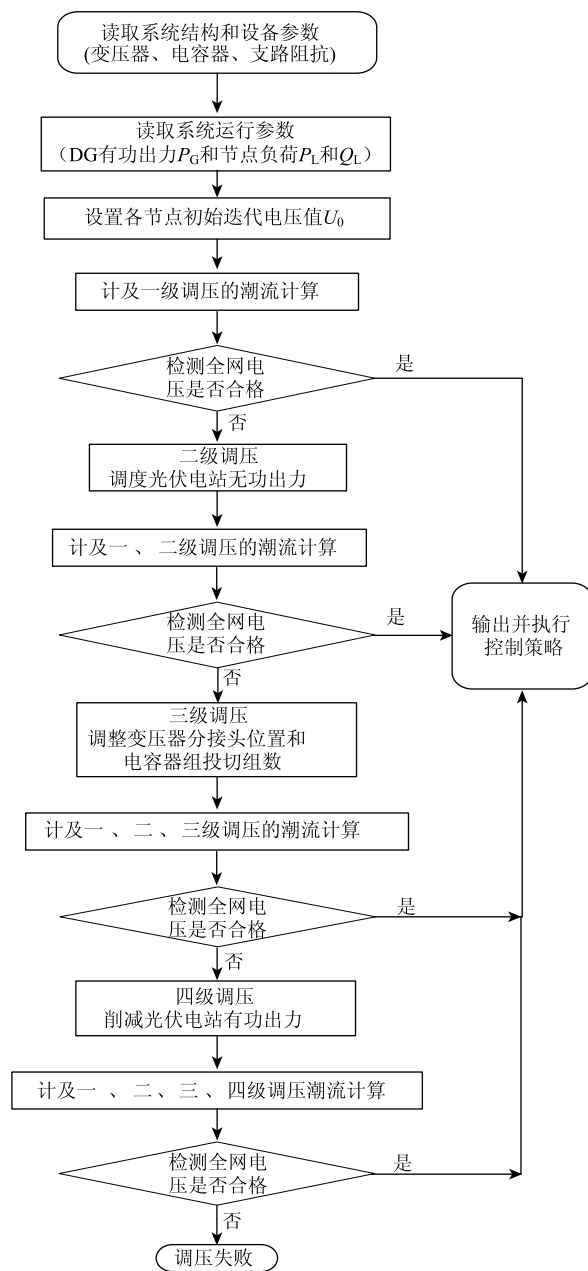


图5 主动配电网多级无功电压控制流程图
最大迭代次数为 100。

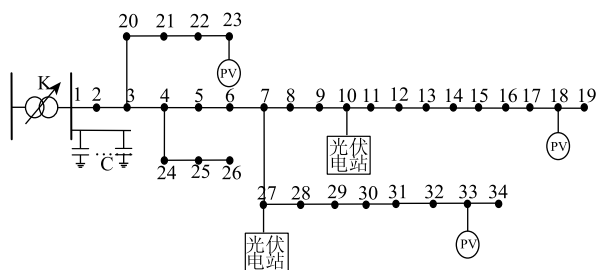


图6 改进的 IEEE33 节点配电网结构图

仿真结果分析: 由图 8、9 可知, 全网电压在

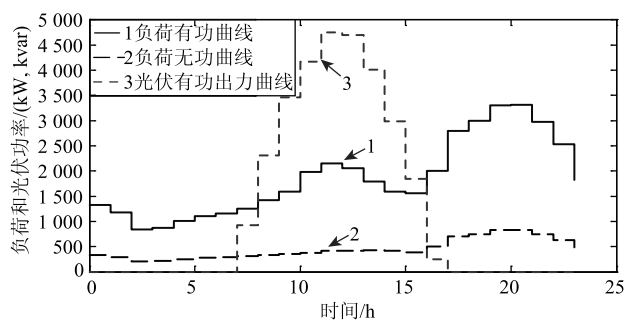


图 7 负荷和光伏出力曲线

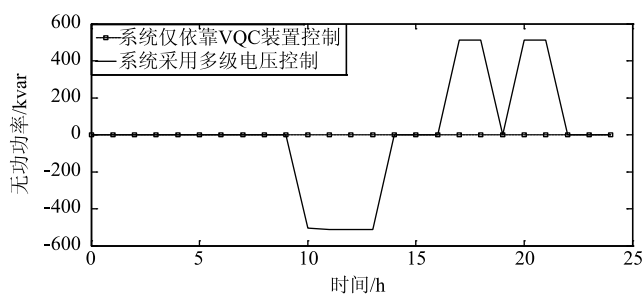


图 8 节点 7 处光伏电站无功出力变化

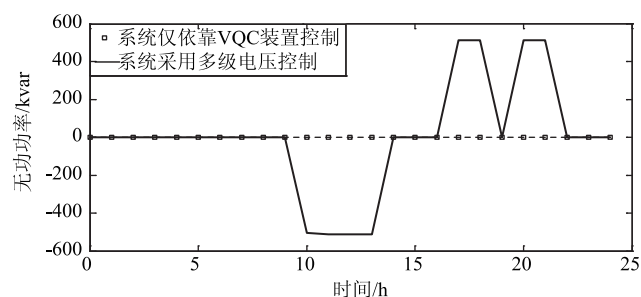


图 9 节点 27 处光伏电站无功出力变化

绝大多数时间，通过分散式就地控制即可将全网电压维持在合理区间，只在中午和晚上时段，系统进行了二级调压控制，而传统调压方式并未考虑光伏电站无功出力，故一直不动作。

如图 10、11 中虚线所示，若不考虑用户侧小容量光伏和光伏电站的无功调压能力，变压器分接头和电容器组受并网光伏出力波动的影响，将会频繁动作，影响设备使用寿命，甚至 VQC 装置尽最大能力仍无法满足现有的调压要求，需要通过削减光伏有功出力的措施来维持全网电压质量，降低了系统对光伏的消纳能力。而计及小容量光伏就地无功电压控制和光伏电站无功调度后，可以保证绝大多数时间内全网电压的质量，仅需要在中午和晚上负荷波动变化较大时段，需要对 VQC 装置进行调度

调压，明显减少了 VQC 装置的动作次数。如图 10、11 中实线所示，采用多级调压控制手段后，变压器由原来的动作次数 9 次减少为 2 次，电容器组的动作次数由原来的 7 次减少为 1 次。此次仿真程序已考虑对光伏电站有功削减环节，由于前三级调压手段对电压调控能力较大，仿真结果并未出现对光伏电站有功出力进行削减的情形。

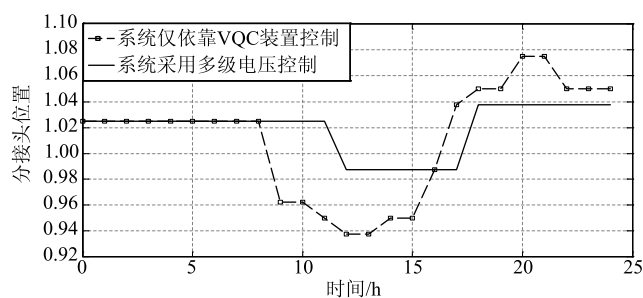


图 10 变压器分接头变化情况

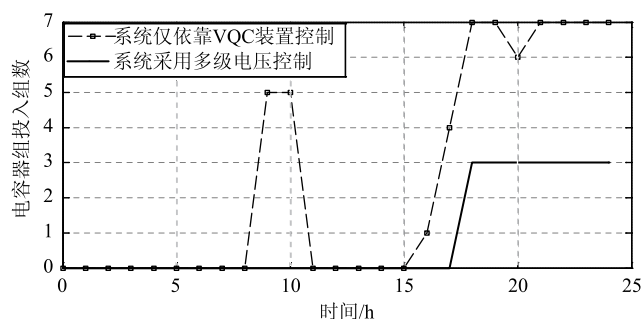


图 11 电容器组投切情况

如图 12、13 所示，比对了不同电压控制方式。当光伏采用单位功率因数并网时，无论首端、末端节点电压越限现象很明显；当系统仅依靠 VQC 装置调压时，末端节点在夜间出现了电压越限行为；而本文提出的多级电压控制在电压控制方面的效果很显著，电网电压得到极大改善，实现了全网范围时段电压处在较好水平，并明显缩小电压波动范围。

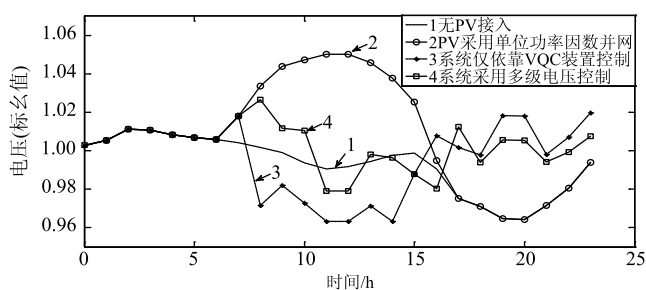


图 12 不同控制方式下节点 3 日电压变化曲线

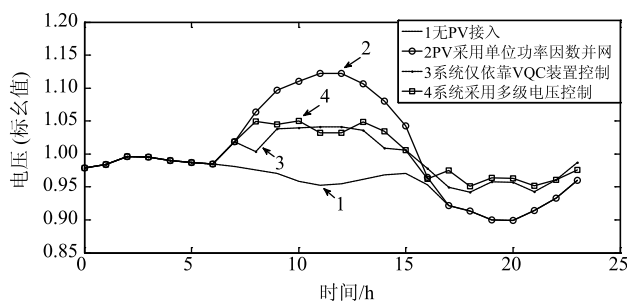


图 13 不同控制方式下节点 19 日电压变化曲线

5 结束语

本文通过对主动配电网无功电压控制技术的研究,针对分布式光伏并网引起的电压越限问题,充分利用网络内现有资源,提出了多级调压控制策略。其中一级调压对象为小容量分布式光伏,控制方式为分散式就地控制,改进了原有控制策略,提出了基于并网点电压和有功出力联合控制的 $\cos\varphi(U, P)$ 控制策略;二、三、四级调压对象分别为光伏电站无功、VQC 装置和光伏电站有功,控制方式为集中式协调控制。通过本文设计的四级调压控制体系,该综合调压控制体系在保证全网电压质量的基础上,提高了电网对分布式光伏的接纳能力,明确了各级调压手段和目的,避免了所有变量统一协调控制时动作结果物理意义不明确的问题,并明显减少了传统 VQC 装置动作次数。

参考文献

- [1] 范元亮, 赵波, 江全元, 等. 过电压限制下分布式光伏电源最大允许接入峰值容量的计算 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 40-44.
- [2] Choi J H, Kim J C. Advanced voltage regulation method of power distribution systems interconnected with dispersed storage and generation systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 329-334.
- [3] 杨素琴, 罗念华, 韩念杭. 分布式电源并网动态无功优化调度的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 122-126.
- [4] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.
- [5] 余昆, 曹一家, 陈星莺, 等. 含分布式电源的地区电网无功电压优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 28-32.
- [6] Majumder R. Aspect of voltage stability and reactive power support in active distribution [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(3): 442-450.
- [7] 邢海军, 程浩忠, 张逸. 基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化 [J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1504-1510.
- [8] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143-151.
- [9] 陈飞, 刘东, 陈云辉. 主动配电网电压分层协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 61-67.
- [10] VDE. Generators connected to the low-voltage distribution network-Technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks (VDE-AR-N 4105), 2011.
- [11] Craciun B-I, Man E A, Muresan V A, et al. Improved voltage regulation strategies by PV inverters in LV rural networks [C] //Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Aalborg, 2012: 775-781.
- [12] Shang W, Zheng S, Li L, et al. A new volt/VAR control for distributed generation [C] //Power Engineering Conference (UPEC), 2013. 48th International Universities. IEEE, 2013: 1-5.
- [13] Sansawatt T, O'Donnell J, Ochoa L F, et al. Decentralised voltage control for active distribution networks [C] //Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International. IEEE, 2009: 1-5.
- [14] 国家电网公司. GB/T29319—2012 光伏发电系统接入配电网技术规定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

收稿日期: 2017-01-15

作者简介:

王永全(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网无功电压控制, E-mail: yungquanwang@163.com;
李振坤(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为配电网规划及运行控制、分布式电源并网及微电网、主动配电网技术等, E-mail: lzk021@163.com.

(责任编辑: 杨秋霞)