

基于功率控制的含高渗透率户用光伏低压配电网电压控制策略

伍惠铖¹, 王 淳¹, 尹发根², 陈宇杰¹, 刘 宽¹

(1. 南昌大学电气与自动化工程系, 江西 南昌 330031; 2. 宜春学院物理科学与工程技术学院, 江西 宜春 336000)

摘 要:有载调压器(OLTC)和电容器组已被普遍用于处理含高渗透率户用光伏的低压配电网电压越限问题。控制策略的不同将直接影响到节点电压和 OLTC 分接头调节及电容器组投切次数。为寻求一种适合于解决低压配电网电压越限问题的控制策略,在分析 OLTC 参考电压对电压控制策略影响的基础上,基于电压灵敏度矩阵理论,提出基于功率控制的电压控制策略。为同时考虑时序性和随机性对光伏出力和负荷的影响,该控制策略采用基于序贯蒙特卡罗模拟的概率潮流计算网络有功损耗和节点电压越限概率值。在算例中将该方法与基于时间控制的电压控制策略进行对比,结果表明,采用基于功率控制的电压控制策略,在有效降低网络电压越限概率的同时,还能有效减少分接头和电容器组动作次数,降低有功网损,有效提高低压配电网对高渗透率户用光伏发电接入的消纳能力。

关 键 词:低压配电网;有载调压器;电容器组;高渗透率;电压灵敏度;电压控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.004 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2020)05-0027-09

Power control-based voltage control strategy of LV distribution network with high penetrations residential PVs

WU Huicheng¹, WANG Chun¹, YIN Fagen², CHEN Yujie¹, LIU Kuan¹

(1. Department of Electrical and Automatic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. College of Physical Science and Engineering Technology, Yichun University, Yichun 336000, China)

Abstract: On-load tap changers(OLTC)and capacitor banks have been widely utilized to deal with the problem of voltage violation in low-voltage(LV) distribution networks with high-penetration photovoltaic(PV). Different control strategies would directly affect the node voltage and operation number of OLTC tap and capacitor bank. In order to seek a suitable control strategy for handling the voltage violation problem in LV distribution network, a power control-based(PCB)voltage control strategy is proposed on the basis of the analysis of the influence of OLTC reference voltage on the voltage control strategy and the voltage sensitivity matrix theory. In order to consider the influence of time sequence and randomness on PV output and load, probabilistic power flow based on sequential Monte Carlo simulation is utilized to calculate the probability values of network active power loss and node voltage violation probability. The proposed method is compared with the time control-based(TCB)strategy in the test case. It is shown that the TCB based on the power control not only reduce the node voltage violation probability effectively, but also effectively

收稿日期:2018-05-17;修回日期:2018-09-13

基金项目:国家自然科学基金(51467012);国家国际科技合作专项(2014DFG72240)

通信作者:王 淳(1963-),男,博士,教授,主要从事电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用研究;E-mail:cu_wang@162.com

reduce the action times of taps and capacitor banks, reduce the active power loss, and improve the ability of low-voltage distribution network to absorb high-permeability household photovoltaic power generation.

Key words: LV distribution network; OLTC; capacitor banks; high penetration; voltage sensitivity; voltage control

充分利用可再生能源是推进能源革命,实现能源和环境可持续发展的必然选择,大力发展新能源是中国电力发展的重点任务之一^[1],按照电力发展“十三五”规划,将全面推进分布式光伏发电。由于光伏发电的时序特性,如果与负荷不匹配,将增大系统净负荷峰谷差,造成网络严重的电压越限问题^[2-3]。

对于由高渗透光伏接入低压配电网引起的电压越限问题已越来越受到关注^[4-8]。一般考虑利用调压速度快、范围广的有载调压变压器对配电网电压进行调整。文献[9-10]利用 OLTC 来处理低压配电网接入光伏比例过高的问题,通过对变压器出口电压和馈线末端电压进行调节,解决了系统过电压问题,实现了系统的经济运行;文献[11-12]提出了一种 OLTC 和 DSTATCOM 的光伏并网系统联合电压调整方案。尽管将有载调压与无功补偿装置结合起来对网络电压具有良好的控制效果,但这些方法未对 OLTC 进行控制以减少分接头动作次数。文献[13]对变压器二次侧电压变化范围进行分析,给出了变压器二次侧电压控制策略,用该策略对 OLTC 控制以减少分接头动作次数,但由该策略求得的变压器二次侧电压受网络馈线特点、系统节点数和阻抗矩阵影响,计算过程复杂;文献[14]提出了一种基于远程通信的电压控制方法;通过通信设备来采集某低压网络中 OLTC 和网络各节点运行数据,利用这些数据来分析网络在不同光伏渗透率下的电压越限问题,仿真结果表明该方法在减少分接头动作的同时,能有效解决电压越限问题,但提出的基于 OLTC 控制方法需要通过远程通信获取相关数据,对低压配电网通信和自动化水平要求较高。同样地,以上方法也没考虑光伏出力与居民负荷呈现出较强的时序性和随机性对基于 OLTC 的电压控制策略的影响。

在配电网中,任意节点的电压增量均是由于网络中各节点功率增量的总和所引起的^[7]。文献[15]基于电压灵敏度,得到了电压增量与功率增量之间的关系;文献[16-17]对电压灵敏度提出了一种求解

方法,并证明了该方法和所求解数值的可用性。

针对高渗透率接入低压配电网引起的电压越限问题,该文在分析 OLTC 参考电压对电压控制策略影响的基础上,基于电压灵敏度矩阵理论,得到节点电压幅值变化量与有功和无功变化量之间的关系,提出了基于功率控制的电压控制策略,并配合电容器组来解决因光伏高渗透率带来的低压配电网电压问题。为同时考虑时序性和随机性对光伏出力和负荷的影响,采用基于序贯蒙特卡罗模拟^[18]的概率潮流计算网络有功损耗和节点电压越限概率值。在算例中将该方法与文献[14]提出的基于时间控制(time control-based, TCB)的电压控制策略进行对比,验证该文方法的有效性。

1 低压配电网元件操作模型及其潮流计算

图 1 为一条 220 V 放射式低压单相配电馈线,该系统包含一台 OLTC、若干电容器组以及一条低压馈线,馈线上共有 N 个节点,取平衡节点 0 作为参考节点,参考电压为 V_0 。

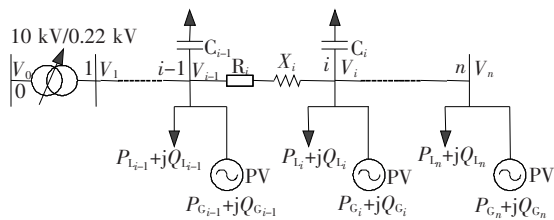


图 1 含有 N 节点的放射式低压配电馈线

Figure 1 Radial low-voltage distribution feeder with N nodes

令 $n = N - 1$,则支路数 b 等于 n ,每条支路的编号与该支路末节点编号一致。每个节点上有一户安装有光伏发电的用户。馈线上任意节点 i 有功净值 P_i 和无功净值 Q_i 分别表示为

$$P_i = P_{L_i} - P_{G_i} \quad (1)$$

$$Q_i = Q_{L_i} - Q_{G_i} - q_{C_i} \quad (2)$$

式中 P_{L_i} 、 Q_{L_i} 为节点 i 处的有功和无功负荷;

P_{G_i} 、 Q_{G_i} 为安装在节点 i 处的光伏发电系统的有功、无功出力; q_{C_i} 为安装在节点 i 处的电容器组注入的无功功率。

注入节点 i 的有功 $\Delta P_{i,t}$ 和无功 $\Delta Q_{i,t}$ 在时刻 t 的变化量可由式(3)、(4)计算:

$$\Delta P_{i,t} = |P_{i,t} - P_{i,t-1}| \quad (3)$$

$$\Delta Q_{i,t} = |Q_{i,t} - Q_{i,t-1}| \quad (4)$$

按照式(3)~(4)计算网络所有节点(除平衡节点)的有功、无功变化量就可形成 t 时刻下网络有功、无功变化向量:

$$\Delta \mathbf{P}_t = [\Delta P_{1,t}, \Delta P_{2,t}, \dots, \Delta P_{n,t}]^T,$$

$$\Delta \mathbf{Q}_t = [\Delta Q_{1,t}, \Delta Q_{2,t}, \dots, \Delta Q_{n,t}]^T.$$

1.1 OLTC 操作模型

有载调压变压器的变比调节通常分为离散型和连续型 2 种类型,该文采用离散模型。通过对变比的离散调节以控制变压器二次侧电压 V_1 的值,使得 V_1 的大小维持在允许的运行范围内,其操作过程:

$$e = V_1 - V_{\text{set}} \quad (5)$$

$$t(\tau + 1) = t(\tau) + \Delta T_\tau \quad (6)$$

$$\begin{cases} 1, & \text{for } e > \epsilon/2, t \geq T_d \\ -1, & \text{for } e < -\epsilon/2, t \geq T_d \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$f(e, t) = \begin{cases} 1, & \text{for } e > \epsilon/2, t \geq T_d \\ -1, & \text{for } e < -\epsilon/2, t \geq T_d \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 1, & \text{for } e > \epsilon/2, t \geq T_d \\ -1, & \text{for } e < -\epsilon/2, t \geq T_d \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$n(t + 1) = n(t) - d \cdot f(e(t), t) \quad (8)$$

式中 e 为变压器二次侧电压 V_1 与电压参考值 V_{set} 之间的电压差; t 为 OLTC 动作的一个离散时刻; τ 为计数器; ΔT_τ 为一常数,由 OLTC 的特性及电压降落决定,当从时间 t 开始,一旦时间等于或超过 ΔT_τ ,计数器将从 τ 到 $\tau + 1$ 累进; ϵ 为电压死区,其作用是当电压运行在允许范围之内时避免 OLTC 分接头不必要的动作; n 为分接头位置; d 为 OLTC 分接头改变的级数; T_d 为 OLTC 动作延时。

从式(5)~(8)可以得到,当 e 大于 $\epsilon/2$ (或 e 小于 $-\epsilon/2$)时,经过 T_d ,OLTC 变比 n 增大(或减小) d 级,使得 V_1 减小(增大),使其等于或接近于参考值 V_{set} 。

1.2 电容器组操作模型

当电容器组安装节点处的电压低于电容器组工作电压 V_{on} 时,经过投入电容器组必需的机械时间 T_{on} ,电容器组投入运行;当电容器组安装节点处的

电压高于电容器组关断电压 V_{off} 时,经过电容器组退出必需的机械时间 T_{off} ,电容器组退出运行。安装在节点 i 处的电容器组操作过程:

$$Q_{C_i} = Q_{C,\text{rat}} V_i^2 \quad (9)$$

$$q_{C_i} = c_{i,t} Q_{C_i} = c_{i,t} Q_{C,\text{rat}} V_i^2 \quad (10)$$

$$e_1 = V_{i,t} - V_{\text{on}} \quad (11)$$

$$e_2 = V_{\text{off}} - V_{i,t} \quad (12)$$

$$c_{i,t} = \begin{cases} 1, & \text{for } e_1 < 0, \tau_c > T_{\text{on}} \\ 0, & \text{for } e < 0, \tau_c > T_{\text{off}} \\ c_{i,t-1}, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中 V_i 为节点 i 的电压标么值; $Q_{C,\text{rat}}$ 为电容器的额定容量; Q_{C_i} 为电容器输入系统的无功功率; q_{C_i} 为时刻 t 电容器注入系统的无功功率; $c_{i,t}$ 为节点 $i + 1$ 处的电容器组的工作状态的二进制数, $c_{i,t} = 1$ 表示在时刻 t 节点 i 处的电容器组处于工作状态, $c_{i,t} = 0$ 表示在时刻 t 节点 i 处的电容器组处于关闭状态。

1.3 潮流计算

光伏出力直接受光强、温度以及季节影响,具有明显的时序特性和随机性^[19-21]。为同时考虑时序性和随机性对光伏出力和负荷的影响,采用 Beta 分布近似描述光伏出力随机性,采用正态分布近似描述居民负荷随机性^[22],同时利用序贯蒙特卡罗模拟法来模拟系统一年的运行情况。一年中,12~2 月为冬季、3~5 月为春季,6~8 月为夏季、9~11 月为秋季,考虑不同光伏渗透率的情况,通过对不同季节的负荷日曲线和光伏日出力曲线按其分布函数进行随机抽样,得到不同渗透率下的全年 8 760 h 的负荷数据和光伏出力数据。采用牛顿法计算各个抽样点配电网的确定性潮流,将 8 760 h 的确定性潮流结果进行统计得到系统节点状态电压、系统网络损耗和节点电压越限概率值,通过这些数值来分析该文提出的电压控制策略的性能。

图 2 所示为抽样得到的某节点每个季节中一周的负荷曲线及某 500 kW 户用光伏每个季节中一周的出力曲线。图 2 中 1~168、169~336、337~504、505~672 h 分别代表春季、夏季、秋季、冬季某一周。从图 2 中可以看出,居民负荷及光伏出力具有明显的波动性。

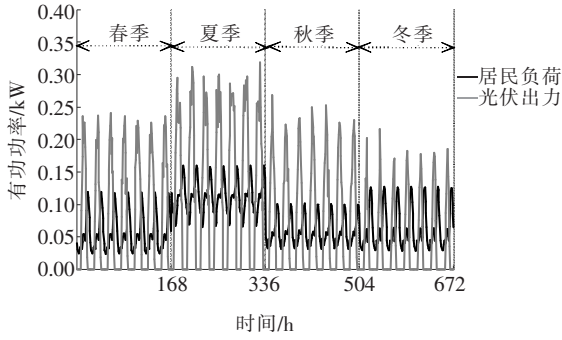


图2 每个季节中一周的负荷曲线及光伏出力曲线

Figure 2 Load curve and output curve of a residential PV during a week in each seasons

2 基于功率控制的电压控制策略

由图2可知,居民负荷峰值通常出现在夜间(17:00—20:00),光伏出力接近为0,此时系统容易出现电压越下线的风险;正午时段的光照强度大,光伏出力接近满发的同时居民负荷通常维持在较低的水平,此时网络容易出现电压越上限的风险。根据居民负荷的变化来改变 V_{set} ,可以缩小二次侧电压的变化幅度,甚至改变电压变化的趋势,给光伏高渗透率接入网络的情况下提供一种有效的电压控制策略。

2.1 电压灵敏度矩阵的建立

根据图1所示的网络,流入任意节点 i 的有功功率 $P_{\text{line},i}$ 和无功功率 $Q_{\text{line},i}$ 为

$$\begin{cases} P_{\text{line},i} = \sum_{k=i}^n P_k + \sum_{k=i+1}^n P_{\text{loss},k} \\ Q_{\text{line},i} = \sum_{k=i}^n Q_k + \sum_{k=i+1}^n Q_{\text{loss},k} \end{cases} \quad (14)$$

式中 $P_{\text{loss},k}$ 和 $Q_{\text{loss},k}$ 为支路 k 上的有功和无功损耗; P_k 和 Q_k 为节点 k 的有功净值和无功净值。

任意2个节点间的电压损耗可以表示为

$$\Delta V_i = V_{i-1} - V_i = \frac{R_i \cdot P_{\text{line},i} + X_i \cdot Q_{\text{line},i}}{V_i} \quad (15)$$

其中 R_i 和 X_i 分别为支路 i 的电阻和电抗,若支路为变压器支路,则 R_i 和 X_i 为折算到二次侧后的值。

由于损耗功率占总传输功率的比值较小,因此

将其忽略以简化推导结果:

$$\begin{cases} P_{\text{line},i} \approx \sum_{k=i}^n P_k \\ Q_{\text{line},i} \approx \sum_{k=i}^n Q_k \end{cases} \quad (16)$$

任意节点 i 的电压可以表示为

$$V_i \approx V_0 - \sum_{l \in \Theta_{\text{CN}0,i}} \frac{R_l \cdot P_{\text{line},l} + X_l \cdot Q_{\text{line},l}}{V_l} \quad (17)$$

式中 $\Theta_{\text{CN}0,i}$ 为节点 i 到平衡节点0的线路和节点集合; V_l 为节点 l 的电压量测数据,在实际情况中, V_l 的数值变化很小,近似将其视为常数^[7],一般设为网络的额定电压。

在此引入道路关联矩阵 \mathbf{T} ,则式(16)可进一步写成:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{\text{line}} \approx \mathbf{T}^T \mathbf{P} \\ \mathbf{Q}_{\text{line}} \approx \mathbf{T}^T \mathbf{Q} \end{cases} \quad (18)$$

式中 \mathbf{T} 是一个 $n \times b$ 阶的道路关联矩阵,假定道路的方向都是从电源点指向各节点,各支路方向与道路方向相同,如果支路 j 在道路 i 上,则 $\mathbf{T}(i, j) = 1$,反之 $\mathbf{T}(i, j) = 0$,其上标 T 表示转置; \mathbf{P}_{line} 和 \mathbf{Q}_{line} 是除平衡节点外流入节点有功、无功功率的向量,阶数为 $n \times 1$ 阶; \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 表示馈线上除平衡节点外所有节点的有功、无功净值向量,阶数为 $n \times 1$ 阶。

式(17)可写成:

$$\mathbf{V} \approx V_0 \cdot \mathbf{E} - \mathbf{T} \cdot \left(\frac{\mathbf{R} \circ \mathbf{P}_{\text{line}} + \mathbf{X} \circ \mathbf{Q}_{\text{line}}}{V_N} \right) \quad (19)$$

式中 \mathbf{V} 是除平衡节点外所有节点的电压幅值向量,阶数为 $n \times 1$ 阶; \mathbf{E} 为 $n \times 1$ 阶的全1矩阵; \mathbf{R} 是支路电阻矩阵, \mathbf{X} 是支路电抗矩阵,其阶数均为 $b \times 1$; \circ 为Hadamard乘积,对应Matlab中的点乘; V_N 为系统额定电压。

为衡量任意节点间有功变化对于某节点的影响,将式(18)代入式(19)并进行求导后可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}} &= -\mathbf{T} \frac{\partial}{\partial \mathbf{P}} \left(\frac{\mathbf{R} \circ \mathbf{P}_{\text{line}}}{V_N} \right) = \\ &= -\mathbf{T} \left(\frac{\mathbf{R}}{V_N} \circ \frac{\partial}{\partial \mathbf{P}} (\mathbf{T}^T \mathbf{P}) \right) = -\mathbf{T} \left(\frac{\mathbf{R}}{V_N} \circ \mathbf{T}^T \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{P}} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

对式(20)中的求导元素进行分析:

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial P_1} & \frac{\partial P_2}{\partial P_1} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial P_1} & \frac{\partial P_n}{\partial P_1} \\ \frac{\partial P_1}{\partial P_2} & \frac{\partial P_2}{\partial P_2} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial P_2} & \frac{\partial P_n}{\partial P_2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_1}{\partial P_{n-1}} & \frac{\partial P_2}{\partial P_{n-1}} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial P_{n-1}} & \frac{\partial P_n}{\partial P_{n-1}} \\ \frac{\partial P_1}{\partial P_n} & \frac{\partial P_2}{\partial P_n} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial P_n} & \frac{\partial P_n}{\partial P_n} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (21)$$

由式(21)可知, $\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{P}}$ 为对角元素为 1、非对角元素为 0 的 $n \times n$ 阶的对称方阵。当网络为放射状时, \mathbf{T} 也为 $n \times n$ 阶方阵, 因此, 根据矩阵运算可知, $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}}$ 为 $n \times n$ 阶的对称方阵。整理式(20)、(21)可得式(22):

$$\mathbf{S}_{V-P} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}} = -\frac{\mathbf{T} \cdot \text{diag}(\mathbf{R}) \cdot \mathbf{T}^T}{V_N} \quad (22)$$

式中 \mathbf{S}_{V-P} 为电压—有功灵敏度矩阵, 为 $n \times n$ 阶对称方阵; $\text{diag}(\cdot)$ 表示构造一个以某向量为对角元素, 不在对角线上元素全为 0 的方阵。

同理可以求出电压—无功灵敏度矩阵:

$$\mathbf{S}_{V-Q} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}} = -\frac{\mathbf{T} \cdot \text{diag}(\mathbf{X}) \cdot \mathbf{T}^T}{V_N} \quad (23)$$

因此, 电压灵敏度矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{V-P} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{P}} = -\frac{\mathbf{T} \cdot \text{diag}(\mathbf{R}) \cdot \mathbf{T}^T}{V_N} \\ \mathbf{S}_{V-Q} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Q}} = -\frac{\mathbf{T} \cdot \text{diag}(\mathbf{X}) \cdot \mathbf{T}^T}{V_N} \end{cases} \quad (24)$$

可见, 网络拓扑结构和阻抗参数一旦确定, 根据式(24)即可得到网络的常数灵敏度矩阵。由此可得, 除平衡节点外其余 n 个节点的电压幅值变化量 $\Delta \mathbf{V}$ 与有功、无功变化量 $\Delta \mathbf{P}$ 、 $\Delta \mathbf{Q}$ 满足:

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{S}_{V-P} \Delta \mathbf{P} + \mathbf{S}_{V-Q} \Delta \mathbf{Q} \quad (25)$$

任意节点 i 的电压变化与全网的节点功率变化之间的关系可以表示为

$$\Delta V_i = \sum_{j=1}^n S_{V-P_{i,j}} \cdot \Delta P_j + \sum_{j=1}^n S_{V-Q_{i,j}} \cdot \Delta Q_j \quad (26)$$

式中 $S_{V-P_{i,j}}$ 、 $S_{V-Q_{i,j}}$ 为矩阵 \mathbf{S}_{V-P} 、 \mathbf{S}_{V-Q} 中第 (i, j) 个元素。

2.2 基于功率控制的电压控制策略

基于功率控制的电压控制策略操作步骤:

1) 根据网络信息计算得到电压—有功灵敏度矩阵 \mathbf{S}_{V-P} 和电压—无功灵敏度矩阵 \mathbf{S}_{V-Q} ;

2) 计算时刻 t 下的网络节点有功、无功增量向量 $\Delta \mathbf{P}_t$ 、 $\Delta \mathbf{Q}_t$, 根据式(26)计算得到除平衡节点外所有节点的电压变化量 $\Delta \mathbf{V}_t$;

3) 计算时刻 t 下的网络潮流(OLTC 分接头位于主接头位置), 形成馈线末端节点电压向量 $\mathbf{V}_{\text{end},t}$, 并按照相应位置形成电压变化量向量 $\Delta \mathbf{V}_{\text{end},t}$;

4) 如果在时刻 t 时馈线末端节点发生过电压情况, V_{set} 的选取为

$$V_{\text{set},t} = V_{1,t} - \max(\Delta \mathbf{V}_{\text{end},t}) \quad (27)$$

如果在时刻 t 时馈线末端节点发生欠电压情况, V_{set} 的选取为

$$V_{\text{set},t} = V_{1,t} + \min(\Delta \mathbf{V}_{\text{end},t}) \quad (28)$$

式中 $V_{1,t}$ 为 OLTC 二次侧电压在 t 时刻的值; 当 $V_{\text{set},t}$ 超过网络节点电压约束范围时, 令其等于相应边界值。

3 算例分析

该文采用 IEEE 33 节点测试系统(图 3)在 MATLAB 仿真平台上对所提出的方法进行仿真实验。考虑到国内低压配电系统运行的实际情况, 将 IEEE33 节点测试系统中第 1 条支路改为 $10.5 \pm 4 \times 2\% / 0.22 \text{ kV}$ 的有载调压变压器支路, 其中有载调压变压器的额定容量为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 用 1~9 分别代表其 9 个分接头位置, 5 代表主接头位置。为方便研究, 该文将有载调压变压器的电阻和励磁电抗忽略不计, 保持其漏电抗值不变, 为 0.03Ω , 电压死区 ϵ 为 0.07。线路和负荷数据, 以及负荷曲线、光伏出力曲线、负荷和光伏出力随机参数均取自文献[22]。在不同渗透率下, 接入节点的 PV 数量不同, 但其容量均为 500 kW 。在节点 18、22、25、33 安装容量为 $15 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的电容器组, 电容器组工作电压 V_{on} 和关断电压 V_{off} 均取 0.9 p.u.。为实现电容器组与 OLTC 相互配合调压, 电容器组投、切机械时间 T_{on} 、 T_{off} 小于 OLTC 动作延时 T_d , 即系统电压越下限时, 电容器组先于 OLTC 动作。节点电压约束范围为 $0.9 \sim 1.07 \text{ p.u.}$ 。

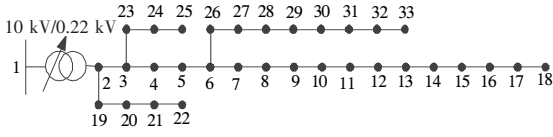


图3 改进的 IEEE 33 节点测试系统

Figure 3 Improved IEEE 33-bus test system

该文定义光伏渗透率:安装了光伏发电的用户数占网络中总用户数的百分比。

为验证该文提出的基于功率控制的电压控制策略的有效性和优越性,将控制策略 TCB 作为对比方案,其具体原理详见文献[14]。在该方法中,根据居民用电高峰期和用电低谷期将 OLTC 二次侧电压参考值 V_{set} 分别设为 1.02、0.98 p. u.。为方便叙述,将仅有 OLTC 参与调压的 PCB(TCB)电压控制策略记为 PCB(TCB),将 OLTC 和电容器组配合调压的 PCB(TCB)控制策略记为 PCB-Cap(TCB-Cap)。

图 4 给出了在 60% 的光伏渗透率接入网络的情况下,无任何电压控制策略的每个季节馈线末端节点(节点 18、22、25 和 33)某 2 天的电压曲线。由于无 OLTC 参与调压,馈线末端节点电压出现了明显的越限情况,最大电压为 1.189 3 p. u.,最小电压为 0.818 1 p. u.。

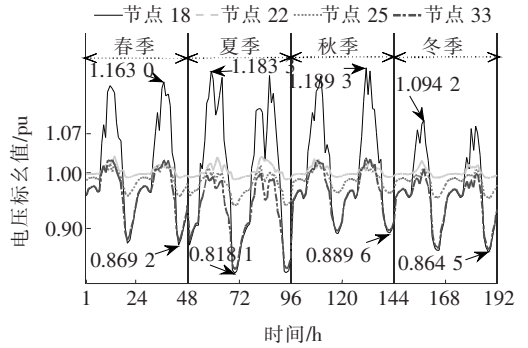


图4 无任何电压控制策略下的节点电压

Figure 4 Node voltages without any voltage control strategies

图 5(a)、(c)给出了控制策略 TCB 和 PCB 在 60% 的光伏渗透率接入网络的情况下,只有 OLTC 参与调压的每个季节馈线末端节点某 2 天的电压以及分接头位置变化曲线;图 5(b)、(d)为在相应控制策略下,OLTC 与电容器组配合调压的电压和分接头位置变化曲线。控制策略 TCB 和 TCB-Cap 根据居民用电高峰期和低谷期来确定 V_{set} ,很大程度缓和了节点电压越限问题,但对网络节点电压的作用有限,如图 5(a)、(b)所示。由于控制策略 PCB 和 PCB-Cap 考虑负荷功率变化对节点电压的影响,使 V_{set} 随着网络功率的变化而变化,在仅有 OLTC 参

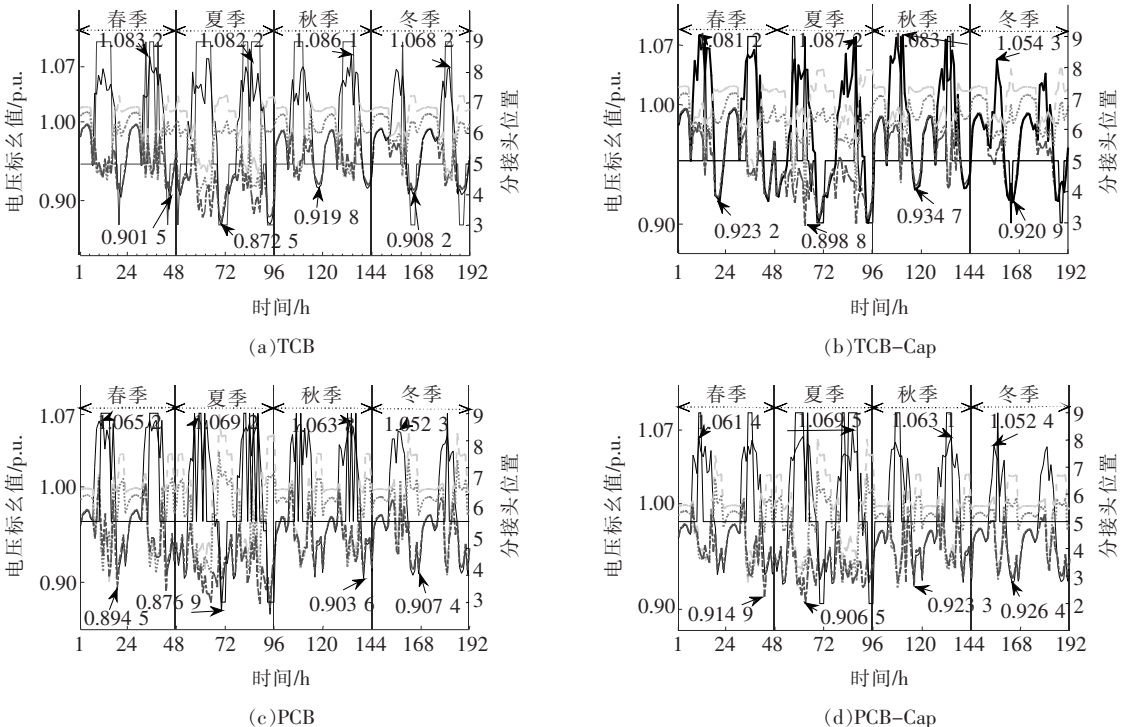


图5 不同控制策略下的节点电压及分接头位置

Figure 5 Node voltages and tap position under different control strategies

与调压时,PCB 能将四季中网络节点最大运行电压控制在规定的范围之内,但在该控制策略下,网络仍会出现轻微的欠电压问题,如图 5(c)所示;当 OLTC 与电容器组合调压(PCB-Cap)时,所有节点在各时段都能在规定范围内安全运行,最高电压为 1.069 5 p. u.,最低电压为 0.906 5 p. u.,如图 5(d)所示。

图 6 给出了控制策略 TCB、PCB 和控制策略 TCB-Cap、PCB-Cap 全年 OLTC 分接头调节次数曲线,图 7 给出了控制策略 TCB-Cap、PCB-Cap 全年电容器组投切次数曲线。控制策略 PCB 和 PCB-Cap 的分接头调节次数均明显少于其它控制策略,

同时控制策略 PCB-Cap 的电容器组投切次数要比控制策略 TCB-Cap 少很多,综合来看控制策略 PCB 具有良好的调压性能。

表 1 给出了在各控制方案不同光伏渗透率下网络全年的有功网损,单位为 MW。从表中数据可以得到,在不同控制方案下,网络全年的有功网损随着光伏渗透率的变化规律呈现“U”型,即网络全年的有功网损先下降再上升。这是因为当光伏渗透率较小时,接入光伏的出力首先用来供应并网节点的负荷,上游馈线的潮流变小,电压损耗也相应降低,从而网络全年的有功网损减少。当光伏渗透率过高时,光伏出力大于并网节点及其附近节点的负荷需求,网络出现逆向潮流,因此网络全年的有功网损增加。

从表 1 中可以看到,在控制策略 PCB-Cap 的调节下,网络全年有功网损在有 OLTC 参与调压的策略当中最小。当光伏渗透率大于 30%时,控制策略 TCB 的有功网损大于无任何控制策略时的有功网损;当光伏渗透率大于 50%时,控制策略 PCB 和 TCB-Cap 开始大于无任何控制策略时的有功网损;当光伏渗透率大于 70%时,控制策略 PCB-Cap 的有功网损才开始增大。随着渗透率升高,与其他控制策略相比,控制策略 PCB-Cap 对限制网络有功网损的增加具有一定优势,这说明控制策略 PCB-Cap 能提高低压配电网对高渗透率户用光伏发电接入的消纳能力。

该文利用基于序贯蒙特卡罗模拟的概率潮流得到全年各节点在不同光伏渗透率情况下电压越限概率。由于末节点是网络中最容易出现电压越限的节点,图 8 给出了控制策略 TCB-Cap 和 PCB-Cap 下节点 18 电压越限概率曲线。在 2 种控制方案中,控制策略 PCB-Cap 对控制节点越限问题具有明显优势,能把网络全年电压越限概率限制在 5%以下。

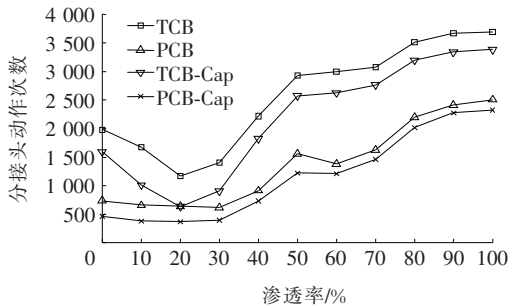


图 6 不同控制策略下网络全年分接头动作次数
Figure 6 Annual number of tap changes under different control strategies

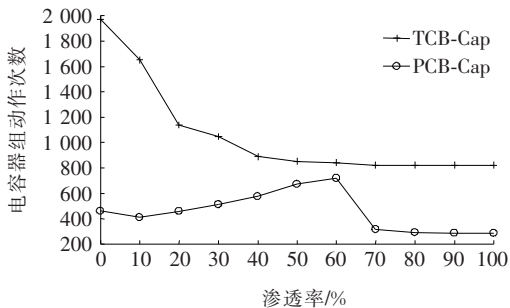


图 7 不同控制策略下网络全年电容器组投切次数
Figure 7 Annual number of capacitor bank operations under different control strategies

表 1 不同控制策略下随光伏渗透率变化的网络全年有功网损

Table 1 Annual active power loss of PV's penetration under different control strategies

控制方案	不同光伏渗透率(%)下的有功网损/MW										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
无控制策略	0.139 4	0.116 4	0.106 9	0.110 8	0.122 1	0.138 5	0.138 4	0.140 5	0.164 0	0.181 6	0.187 3
TCB	0.124 8	0.105 2	0.096 1	0.102 3	0.125 7	0.139 3	0.139 5	0.141 6	0.166 4	0.185 1	0.192 2
PCB	0.124 4	0.104 2	0.096 0	0.101 8	0.124 3	0.133 1	0.139 8	0.144 9	0.175 4	0.188 7	0.198 3
TCB-Cap	0.124 1	0.104 2	0.096 8	0.102 3	0.115 4	0.134 3	0.138 7	0.141 0	0.165 8	0.186 1	0.191 2
PCB-cap	0.123 8	0.103 9	0.096 3	0.101 6	0.115 1	0.132 5	0.134 3	0.137 1	0.165 2	0.184 4	0.190 5

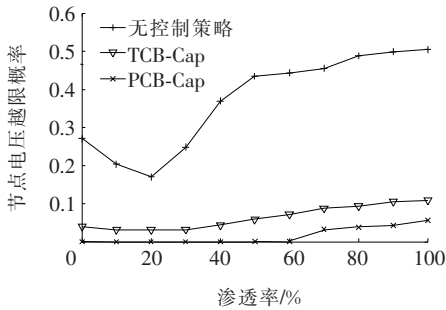


图8 不同控制策略下节点18电压越限概率曲线

Figure 8 Probability curves of node 18 voltage violation under different control strategies

进一步分析,从图8中可以看出,在控制策略TCB-Cap控制下,节点18都会发生电压越限情况,但与无控制策略情况相比,控制策略TCB-Cap仍具有一定控制效果。当光伏渗透率低于60%时,在控制策略PCB-Cap控制下节点18发生电压越限的概率为0,此时网络所有节点电压能在规定运行范围之内。虽然当光伏渗透率高于60%时网络会出现节点电压越限问题,但从网络全年运行角度来看,控制策略PCB-Cap能将所有节点电压越限概率控制在极低水平,说明了该控制策略的有效性。

4 结语

该文基于电压灵敏度矩阵理论,提出基于功率变化的电压控制策略。为同时考虑时序性和随机性对光伏出力和负荷的影响,采用基于序贯蒙特卡罗模拟的概率潮流算法,计算网络有功损耗和节点电压越限概率值。通过仿真结果可以得出以下结论:

1)采用基于功率控制的电压控制策略,当只有OLTC参与调压时,能将网络节点最大运行电压控制在规定范围之内,有效解决网络过电压问题;当仅靠OLTC无法满足网络对节点电压控制的要求时,通过OLTC与电容器组配合调压能有效解决节点欠电压问题;

2)与基于时间控制的电压控制策略相比,基于功率控制的电压控制策略,能有效减少分接头和电容器组动作次数,降低户用全年有功网损,提高低压配电网对高渗透率户用光伏发电接入的消纳能力。

该文主要研究电容器组对接入高渗透率光伏的配电网电压调压作用,未考虑光伏逆变器的无功调压能力,而同时考虑OLTC和光伏逆变器的电压

控制策略有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 国务院. 能源发展战略行动计划(2014—2020)[EB/OL]. [http://politics. people. com. cn/n/2014/1119/c1001-26053481. html](http://politics.people.com.cn/n/2014/1119/c1001-26053481.html).
- [2] 范家铭,夏向阳. 光伏发电并网的有功功率控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4):123-128+147. FAN Jiaming, XIA Xiangyang. Active power control strategy for grid connected photovoltaic power generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4):123-128+147.
- [3] 翁毅选,程韧俐,马伟哲,等. 计及电压波动约束的光伏电源最大可接入容量分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(11):28-32. WENG Yixuan, CHENG Renli, MA Weizhe, et al. Maximun integration capacity of distributed photovoltaic power considering voltage fluctuation[J]. Smart Power, 2018, 46(11):28-32.
- [4] 李振坤,鲍新雨,邵宇鹰,等. 考虑多种调压措施的分布式光伏消纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8):10-16. LI Zhenkun, BAO Xinyu, SHAO Yuying, et al. Studying accommodation ability of distributed photovoltaic considering various voltage regulation measures [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8):10-16.
- [5] Haque M M, Wolfs P. A review of high PV penetrations in LV distribution networks: present status, impacts and mitigation measures[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 62:1195-1208.
- [6] 赵健,王奕凡,谢桦,等. 高渗透率可再生能源接入系统中储能应用综述[J]. 中国电力, 2019, 52(4):167-177. ZHAO Jian, WANG Yifan, XIE Hua, et al. An overview of energy storage applications in power systems with high penetration renewable energy resources [J]. Electric Power, 2019, 52(4):167-177.
- [7] 蔡永翔,张璐,唐巍,等. 考虑逆变器无功充裕性的含高比例户用光伏低压配电网电压控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(9):2799-2808. CAI Yongxiang, ZHANG Lu, TANG Wei, et al. A voltage control strategy for LV distribution network with high proportion residential PVs considering reactive power adequacy of PV inverters[J]. Power System Technology, 2017, 41(9):2799-2808.
- [8] Yang Y H, Sangwongwanich A, Liu H P. Low voltage ride-through of two-stage grid-connected photovoltaic

- systems through the inherent linear power-voltage characteristic[C]//2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, USA; IEEE,2017.
- [9] Procopiou A T, Ochoa L F. Voltage control in PV-rich LV networks without remote monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1224-1236.
- [10] Navarro A, Ochoa L F. Increasing the PV hosting capacity of LV networks: OLTC-fitted transformers vs. reinforcements[C]//2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT),Columbia,USA;IEEE,2015.
- [11] 刘乐. 光伏接入后配网馈线电压协同控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3):43-49.
- LIU Le. Cooperative control of feeder voltage for distribution network with photovoltaic connected[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017,32(3):43-49.
- [12] Pezeshki H, Arefi A, Ledwich G, et al. Probabilistic voltage management using OLTC and dSTATCOM in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018,33(2):570-580.
- [13] Reese C, Buchhagen C, Hofmann L. Enhanced method for voltage range controlled OLTC-equipped distribution transformers[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Sam Diego, CA, USA; IEEE, 2012.
- [14] Chao L, Ochoa L F. Voltage control of PV-rich LV networks: OLTC-fitted transformer and capacitor banks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):4016-4025.
- [15] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6):1578-1587.
- XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distribution networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(6):1578-1587.
- [16] Brenna M, De Berardinis E, Deli Carpin L, et al. Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013,4(2):877-885.
- [17] Zad B B, Hasanvand H, Lorry J, et al. Optimal reactive power control of DGs for voltage regulation of MV distribution systems using sensitivity analysis method and PSO algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015,68:52-60.
- [18] 张宏宇, 印永华, 申洪, 等. 基于序贯蒙特卡洛方法的风电并网系统调峰裕度评估[J]. 电力系统自动化, 2012,36(1):32-37.
- ZHANG Hongyu, YIN Yonghua, SHEN Hong, et al. Peak-shaving margin evaluation associated with wind power integrated system based on sequential monte-carlo method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(1):32-37.
- [19] 符杨, 缪润利, 李振坤, 等. 计及时序特性的主动配电网无功电源规划[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8):12-19.
- FU Yang, MIAO Runli, LI Zhenkun, et al. Reactive-power planning based on time-sequence characteristic of active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(8):12-19.
- [20] 张海鹏, 林舜江, 刘明波. 考虑光伏不确定性的低压配电网分散无功补偿鲁棒优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3880-3888.
- ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Robust optimal allocation of reactive power compensation in low voltage distribution networks considering uncertainty of photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3880-3888.
- [21] 李斌, 吕林, 刘友波, 等. 考虑光伏接入不确定性的主动配电网有功—无功可控资源优化配置[J]. 电网技术, 2017,41(2):355-365.
- LI Bin, LV Lin, LIU Youbo, et al. Optimal configuration of controllable active-reactive power resources in active distribution network considering photovoltaic access uncertainty[J]. Power System Technology, 2017, 41(2):355-365.
- [22] 章力, 高元海, 熊宁, 等. 考虑潮流倒送约束的分布式光伏电站选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17):43-48.
- ZHANG Li, GAO Yuanhai, XIONG Ning, et al. Siting and sizing of distributed photovoltaic power station considering reverse power flow constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(17):43-48.