

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2019.03.007

基于 MPC 的主动配电网多级电压控制

韩华春¹, 窦晓波², 李强¹, 常莉敏², 沈璐², 杜健雄²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:随着光伏高渗透率接入不同电压等级配电网,各电压等级配电网之间相互影响更加复杂,实现运行控制策略的经济性和安全性是一个极大的挑战。文中以中压配电网为控制对象,计及不同电压等级配电网间的交互影响,提出了基于模型预测控制(MPC)的主动配电网多级电压控制方法。中高压配电网控制中,考虑高压配电网所控制的有载调压变压器(OLTC)/并联电容器组(CB)的未来时刻动作计划,建立中高压关联模型,协调控制中压配电网连续型设备与高压配电网离散型设备;中低压配电网控制中,计及中低压配电网间的不确定性交换功率及其相互影响,构建中低压关联模型,实现中压配电网对低压配电网的支撑。最后,在 Matlab 中进行仿真分析,验证所提多级电压控制的可行性和有效性。

关键词:主动配电网;多级电压控制;模型预测控制;反馈校正

中图分类号: TM761⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)03-0041-10

0 引言

为了应对能源危机和环境污染,分布式电源作为清洁能源高渗透率接入配电网,但其出力的不确定性给电网的安全、经济、稳定运行带来了极大的威胁^[1-3],为此,传统配电网逐渐向主动模式转变,并将分布式电源等设备作为调节资源。然而主动配电网基于传统的调节手段,较难在电网的经济性、可靠性上达成高度统一,急需研究面向配电网全局多设备协调控制的策略^[4-6]。文献[7]采用和声算法,基于灵敏度分析确定并联电容器组(switching capacitor bank, CB)的投切量及分布式电源的无功出力。文献[8]提出了一种电压分层协调控制策略,采用自上而下的方式实现电压恢复。文献[9]提出了一种基于两阶段规划的综合调压方法,第二阶段确定有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)分接头位置和CB投切组数,第一阶段确定分布式电源最佳出力。文献[10]采用最优分割法分别对OLTC和CB的静态最优投切序列进行有序聚类,再求得最优出力。文献[11-12]利用粒子群算法,求解含多个变量的混合整数非线性优化问题,完成离散设备和连续设备协调优化。

模型预测控制(model predictive control, MPC)作为一种基于模型的闭环优化控制策略^[13]在主动配电网优化控制中得到了广泛应用。文献[14-15]基于多步动态滚动优化,构建二次规划数学模

型,优化分布式电源出力与OLTC的档位;文献[16]验证了MPC算法能有效应对负荷不确定性对配电网运行的影响。文献[17]提出基于MPC的配电网多时间尺度动态优化调度策略,包含日前调度、日内滚动以及实时反馈;文献[18-19]提出了基于MPC的有功无功协调调控方法,在保证主动配电网安全运行的同时进一步实现运行效益最大化。

上述文献有效解决了主动配电网安全稳定运行的问题,但均从同一电压等级的角度出发。在实际工程中,各电压等级之间的相互影响不可忽视。一方面,高压配电网中OLTC、CB等设备的动作对中压配电网影响较大;另一方面,主动配电网存在双向潮流^[20],不同电压等级间可实现双向支撑。因此有必要研究配电网多电压等级优化控制方法。

基于以上考虑,文中在中压配电网优化中增加对中高压、中低压交互节点的考虑,提出一种基于MPC的多级电压控制方法。首先,依托MPC基本原理,提出包括预测模型、滚动优化和反馈校正的电压控制策略。再根据各电压等级配电网间的交互影响,构建中高压、中低压关联模型。然后计及预测误差,建立滚动优化和反馈校正数学模型。最后,验证了所提方法的有效性与优越性。

1 多级电压控制框架

MPC是一种基于优化算法的控制技术,以预测模型、滚动优化、反馈校正3个基本环节完成闭环控制,在每一个采样时刻通过求解一个有限时域开环最优控制问题获得当前控制指令,将过程中的当前

收稿日期:2018-12-10;修回日期:2019-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777031)

状态作为最优控制问题的初始状态,解得的最优控制序列只实施第一个控制指令。MPC 可以解决含多种不确定因素的系统优化控制问题,具有极强的抗干扰能力和鲁棒性。

图 1 为基于 MPC 的主动配电网多级电压控制框架。文中面向配电网全局电压控制,从多级多设备电压控制的角度出发,优化中压配电网不同类型光伏电站的无功出力,包括专线接入变电站低压侧母线的光伏电站和用户侧光伏电站。控制策略基于 MPC 基本原理,对于预测模型,考虑根据 OLTC、CB 的未来时刻动作计划建立的中高压关联模型;滚动优化阶段,考虑低压配电运行状态确定交互节点电压合理范围和中低压配电网间的不确定性交换功率的影响;反馈校正阶段,计及光伏电站及负荷预测模型误差,解决其带来的控制精度问题。

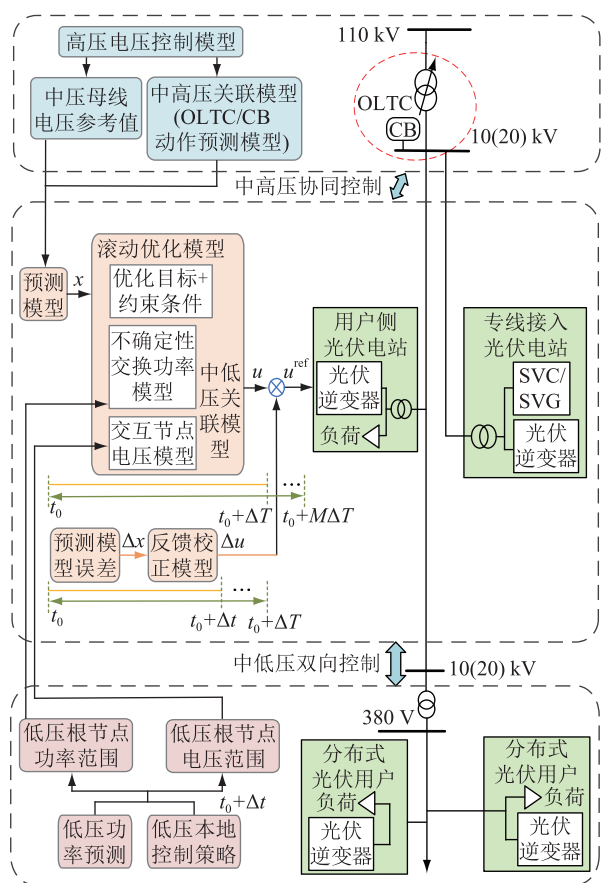


图 1 主动配电网多级电压控制

Fig.1 Multi-level voltage interactive control in active distributed network

文中从预测模型、滚动优化、反馈校正 3 个方面对基于 MPC 的多级电压控制策略进行阐述:

(1) 预测模型。利用日前优化调度,确定次日 OLTC 和 CB 的动作状态及动作量,作为中高压关联模型,即 OLTC 和 CB 动作预测模型;同时,以 ΔT 时段为启动周期,每隔时间间隔 ΔT ,对未来 $M\Delta T$ 时

段中压配电网光伏电站出力和负荷信息进行预测。

(2) 滚动优化。以满足该时段内中压配电网运行经济最优为目标,结合中低压关联模型,并计及不同类型光伏电站调节模型,设计滚动优化数学模型,从而得到 $M\Delta T$ 时段中压配电网光伏电站的出力动作计划,但是仅执行 t_0 时刻光伏电站的控制指令,到了下一个时刻 $t_0 + \Delta T$,时间窗口向后移动一个时间间隔,重复上述过程。

(3) 反馈校正。考虑到在滚动优化环节中压配电网光伏电站出力与负荷信息的预测存在误差,在 ΔT 时间内进行光伏电站出力的反馈校正,提高调压准确性。以 Δt 为采样周期 ($\Delta t < \Delta T$),建立光伏电站与负荷出力的预测误差模型,并基于当前光伏电站出力的量测量进行计算,调整下一个 Δt 时刻光伏电站有功无功出力。

2 中高压协同控制

本节首先阐明高压配电网控制策略,具体提出其控制目标、控制对象,及其与中压配电网的相互影响。接着,结合 OLTC 及 CB 的未来时刻动作计划,构建中高压关联模型,明确其参与电压控制的形式。

2.1 中高压配电网的影响分析

高压配电网基于自动电压控制 (automatic voltage control, AVC) 系统进行电压调控,以控制域内的变电站为控制对象,在网络结构参数及未来一天内负荷母线的有功和无功变化曲线及有功电源给定的情况下,通过调节 CB 组数及 OLTC 分接头,在满足各种物理和运行约束条件下使得整个电网电能损耗最小^[21],从而得到 CB 及 OLTC 在优化控制时段内的动作序列。图 2 为中高压联系拓扑图。

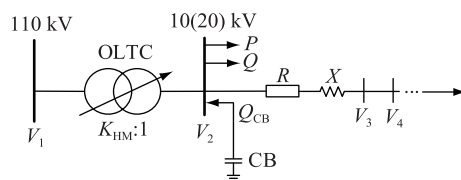


图 2 中高压联系拓扑

Fig.2 Topology of MV distribution network and HV distribution network contact

如图 2 所示,将 OLTC 作为理想变压器,则中压配电网馈线两点电压幅值偏差可以表示为:

$$V_2 - V_3 = \Delta V = \frac{PR + (Q - Q_{CB})X}{V_2} = \frac{PR + (Q - Q_{CB})X}{V_1/K_{HM}} \quad (1)$$

$$Q_{CB} = N_{CB} Q_{CB}^{uni} \quad (2)$$

式中: V_i 为节点 i 的电压幅值; P, Q 分别为起始节点流向下一个节点的有功功率与无功功率; R, X 为两节点间的阻抗; K_{HM} 为 OLTC 变比; N_{CB} 为当前 CB 投切的组数; Q_{CB}^{uni} 为每组 CB 所对应的无功功率。依此可类推馈线其他节点电压幅值。

由此可直观看出, OLTC 变比 K_{HM} 及 CB 投切组数 N_{CB} 可影响变电站低压侧母线电压幅值 V_2 。在高压配电网控制策略中, 通过控制 CB 及 OLTC 动作, 可制定控制时段内中压配电网根节点母线(即变电站低压侧母线)的电压参考值, 该值直接影响到中压配电网电压水平。

随着光伏电站高渗透接入中压馈线, 潮流的双向流动影响中压配电网节点电压水平, 光照充足时, 式(1)中 P, Q 流向改变, $V_3 > V_2, V_2$ 增大并可能出现越上限情况; 而在黑夜时, 光伏无出力, 馈线负荷较重, V_2 减小并可能出现越下限情况。光伏电站出力的不确定性及波动性, 将会导致某些特殊时刻 OLTC 及 CB 出现计划外的动作, 因此中压配电网优化时应尽量避免 OLTC 和 CB 不必要的动作。

2.2 中高压关联模型

基于 OLTC、CB 的计划动作构序列, 构建其预测模型配合高压 AVC 系统控制策略, 即在优化中压配电网光伏电站出力时, 考虑预测域内高压所控 OLTC、CB 的动作, 满足配电网控制需求的同时避免传统调节设备频繁动作。高压配电网 AVC 控制模型可以表示为:

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} f(x_{Ct}, x_{Dt}, x_{St}) = \sum_{t=1}^{24} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j \in C(i)} r_{ij} (I_{ij,t})^2 \right] \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g(x_{Ct}, x_{Dt}, x_{St}) = 0 \\ x_{Cmin} \leq x_{Ct} \leq x_{Cmax} \\ x_{Dmin} \leq x_{Dt} \leq x_{Dmax} \\ x_{Smin} \leq x_{St} \leq x_{Smax} \\ \sum_{t=1}^{23} |C_{m,t-1} \oplus C_{m,t}| \leq M_m \\ \sum_{t=1}^{23} |T_{l,t-1} \oplus T_{l,t}| \leq K_l \end{cases} \quad (4)$$

式中: 以系统网损最小为目标函数, x_{Ct}, x_{Dt}, x_{St} 分别为 t 时刻的连续控制变量、离散控制变量、状态变量, $x_{Ct} = [Q_C]$ 表示发电机无功出力, $x_{Dt} = [C_{m,t}, T_{l,t}]$ 表示 OLTC 分接头档位与 CB 投切档位, $x_{St} = [\theta, U]$ 为表示电网各节点电压的相角和幅值; n 为网络节点数; $C(i)$ 表示与节点 i 相连的所有节点构成的集合; r_{ij} 为支路 ij 的电阻; I_{ij} 为支路 ij 的电流。约束条

件式(4)的第 1 行可表示优化模型中的等式约束, 如潮流方程等, 第 2 到 4 行为控制变量和状态变量的约束范围, 第 5、6 行分别为 CB 投切档位和 OLTC 分接头档位动作次数约束, 其中 $C_{m,t}$ 为第 m 个 CB 开关 t 时段的状态, 1 为闭合, 0 为断开; \oplus 为异或运算符; $T_{l,t}$ 是第 l 个 OLTC 的分接头 t 时段的档位置; M_m 为第 m 个 CB 开关的日允许最大动作次数; K_l 为第 l 个 OLTC 的日允许最大动作次数。

由此可得到预测域内 OLTC 及 CB 的动作序列 C_{OLTC} 和 C_{CB} , 即中高压关联模型可表示为:

$$C_{OLTC} = [K_t, K_{t+1}, K_{t+2}, \dots, K_{t+m\Delta T}] \quad (5)$$

$$C_{CB} = [N_t, N_{t+1}, N_{t+2}, \dots, N_{t+m\Delta T}] \quad (6)$$

3 中低压双向控制

本节结合低压配电网控制策略及运行特点, 分析其与中压配电网间的相互影响, 提出包含不确定性交换功率模型、交互节点电压模型的中低压关联控制模型, 实现中低压配电网的双向功率支撑。

3.1 中低压配电网的影响分析

低压配电网中由于负荷变化等影响, 电压波动往往较频繁, 而 10(20) kV/380 V 的 OLTC 分接头 2 次动作之间需要一定的时间, 且调节范围和动作次数有限, 因此文中考虑将低压配电网中 OLTC 的变化设为定值, 利用光伏逆变器的功率调节能力进行电压控制。低压配电网电压控制以光伏并网点电压在合格范围内为目标, 通过各光伏逆变器的比例积分(proportional integral, PI)控制进行功率跟踪, 准确控制并网点电压。

图 3 为中低压联系拓扑, 可知对于 10(20) kV/380 V 变压器而言:

$$V_{10(20) \text{ kV}} = K_{ML} V_{380 \text{ V}} \quad (7)$$

式中: $V_{10(20) \text{ kV}}, V_{380 \text{ V}}$ 分别为该变压器两侧电压幅值; K_{ML} 为中压配电网与低压配电网间变压器的变比。设定该变压器 10(20) kV 侧为中低压交互节点。由图可分析得出, 由于 K_{ML} 为恒定值, 故通过中压配电网电压控制可改变 $V_{10(20) \text{ kV}}$ 的大小, 进而改变 $V_{380 \text{ V}}$, 影响低压配电网整体电压水平。

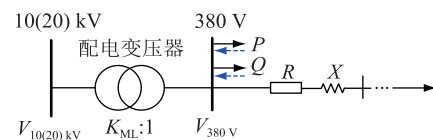


图 3 中低压联系拓扑

Fig.3 Topology of MV distribution network and LV distribution network contact

随着户用光伏高渗透接入低压配电网, 由于低

压居民用户的负荷特性与光伏发电功率特性不一致,负荷高峰时段与光伏功率高峰时段不重叠,导致低压配电网各节点电压变化尤其明显。此外,当低压配电网无法消纳光伏出力时,潮流会由 380 V 馈线流向配电变压器,由于光伏出力的不确定性,中低压配电网间交换的功率会呈现不确定性大小和方向的特征。

3.2 中低压关联模型

一方面,根据预测域内低压配电网户用光伏和负荷信息,确定低压配电网根节点 V_{380V} 的合理电压范围,从而在中压配电网电压控制中增加对交互节点电压 $V_{10(20)kV}$ 的限制,建立中低压交互节点电压模型;另一方面,计及中低压配电网间的不确定性交换功率,构建其数学模型,从而通过优化中压配电网运行状态实现中低压间功率的双向支撑。即在低压配电网光伏出力较多导致功率倒送时,中压配电网可以消耗掉多余的功率并保证低压配电网电压水平;在低压配电网负荷较重且光伏出力较小时,中压配电网为低压配电网提供功率缺额,保障低压配电网供电可靠。

3.2.1 不确定性交换功率模型

中低压交换功率随着低压配电网光伏出力与负荷的变化而变化,采用期望值模型描述其不确定性。

不考虑配电变压器的损耗,在预测域内对中低压交互节点,即图 3 中 V_{380V} 节点进行功率预测,时间间隔与反馈校正控制域 Δt 相同。对采集到的数据,再以滚动优化控制域 ΔT 为间隔计算交互节点功率期望值。故不确定交换功率模型可以表示为:

$$\begin{cases} P_L = E(P) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta T} P dt \\ Q_L = E(Q) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta T} Q dt \end{cases} \quad (8)$$

3.2.2 交互节点电压模型

以滚动优化控制域 ΔT 为时间间隔,采集滚动优化预测域 $M\Delta T$ 时段内低压配电网户用光伏和负荷信息,进行潮流计算获取低压配电网最大电压值 V_H 、最小电压值 V_L 。根据电压不越限、越上限、越下限 3 种情况,结合低压配电网控制策略进行模型设计。具体为:

(1) V_H 越上限。此情况下,低压配电网电压控制动作,越限节点电压被控制到电压上限值。此时,交互节点电压表达式为:

$$1 - \frac{V_{\max} - 1}{2} < \frac{V_{10(20)V}}{K_{ML}} < 1 \quad (9)$$

式中: V_{\max} 为配电网安全运行规定的电压上限。

(2) V_L 越下限。此情况下,低压配电网电压控制动作,越限节点电压被控制到电压下限值。此时,交互节点电压表达式为:

$$1 < \frac{V_{10(20)V}}{K_{ML}} < 1 + \frac{1 - V_{\min}}{2} \quad (10)$$

其中, V_{\min} 为配电网安全运行规定的电压下限。

(3) 电压不越限。此种情况下,低压配电网电压控制不动作,要确保优化后的交互节点电压不会导致某些较高或较低电压水平的低压节点越限。此时,根据低压配电网电压整体电压水平偏上限或偏下限进行讨论,其表达式为:

$$\begin{cases} 1 - \Delta V_H < \frac{V_{10(20)V}}{K_{ML}} < 1 & |\Delta V_H| < |\Delta V_L| \\ 1 < \frac{V_{10(20)V}}{K_{ML}} < 1 + \Delta V_L & |\Delta V_H| \geq |\Delta V_L| \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$\begin{cases} \Delta V_H = V_{\max} - V_H \\ \Delta V_L = V_L - V_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

由此,交互节点电压模型获取流程如图 4 所示。该模型实现在优化中压配电网光伏电站出力时,对中低压交互节点电压进行限制,确保控制时段内低压配电网有理想的电压水平。此外,当户用光伏逆变器无功调节能力不足而导致低压配电网电压控制后某些节点依旧越限时,通过交互节点电压的限制亦可以消除此类事件,从而达到中压配电网对低压配电网的功率支撑。

4 多级电压控制模型

根据中高压关联模型与中低压关联模型,以中压配电网为控制对象,并计及不同类型光伏电站的调节能力,基于 MPC,设计了包含预测模型、滚动优化与反馈校正的多级电压控制数学优化模型。

4.1 预测模型

滚动优化模型需要预测时段内中压配电网光伏电站出力和负荷信息,以及中高压关联模型中的 OLTC、CB 动作序列,如式(5)、式(6)所示。

4.2 滚动优化

4.2.1 优化目标

以预测域 $M\Delta T$ 内中压配电网调节成本、网络损耗最小以及节点电压偏差最小为目标,其表达式为:

$$f = \min(f_1, f_2, f_3) \quad (13)$$

$$f_1 = \sum_{t=t_0}^{t_0+M\Delta T} \sum_{i=1}^{n_{PV}} (C_{i,PV,t}^Q) \quad (14)$$

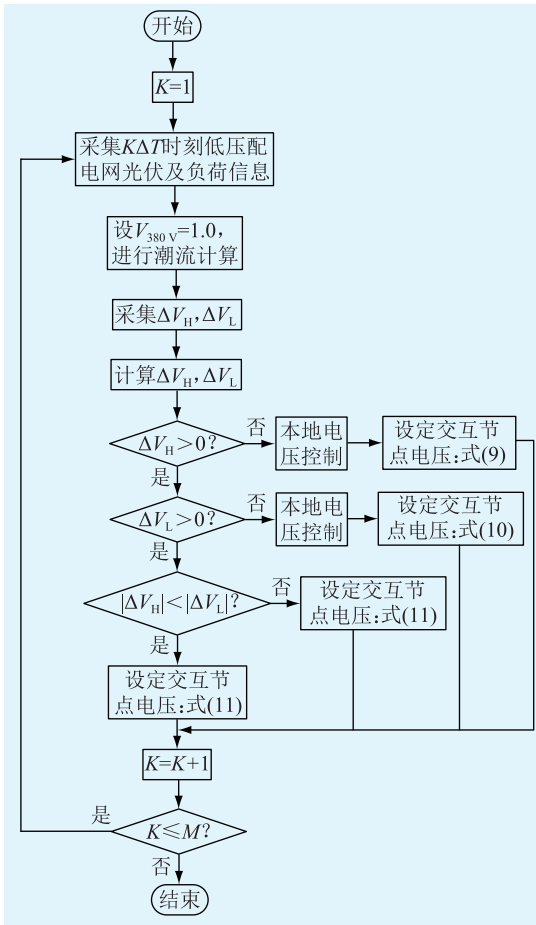


图4 交互节点电压模型流程

Fig.4 Interactive node voltage model flow chart

$$f_2 = \sum_{t=t_0}^{t_0+M\Delta T} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j \in C(i)} r_{ij} I_{ij,t}^2 \right] \quad (15)$$

$$f_3 = \sum_{t=t_0}^{t_0+M\Delta T} \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_{i,t} - V_{i,\text{ref}}}{\Delta V_{i,\text{max}}} \right)^2 \quad (16)$$

式中: $C_{i,\text{PV},t}^Q$ 为 t 时刻光伏电站 i 无功功率调节成本; n_{PV} 为网络中所含光伏电站个数; $V_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的电压幅值; $V_{i,\text{ref}}$ 为节点 i 的电压期望值; $\Delta V_{i,\text{max}}$ 为节点 i 的最大允许电压偏差。

由于不同类型光伏电站内所控无功设备存在差异,故分别建立其无功调节成本模型。对于专线接入变电站低压侧母线的光伏电站,其一般装设有静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 等无功补偿设备,无功调节成本函数可表示为:

$$C_{i,\text{PV},t}^Q = C_{\text{SVC}}^{\text{unit}} \Delta Q_{i,\text{SVC},t} + C_{\text{PV}}^{\text{unit}} \Delta Q_{i,\text{PV},t} \quad (17)$$

式中: $C_{\text{SVC}}^{\text{unit}}$, $C_{\text{PV}}^{\text{unit}}$ 分别为 SVC、光伏逆变器单位无功调节成本; $\Delta Q_{i,\text{SVC},t}$, $\Delta Q_{i,\text{PV},t}$ 分别为 t 时刻光伏电站 i 内 SVC、光伏逆变器无功出力调节量。

对于用户侧光伏电站,仅考虑光伏逆变器调节成本,故其函数可以表示为:

$$C_{i,\text{PV},t}^Q = C_{\text{PV}}^{\text{unit}} \Delta Q_{i,\text{PV},t} \quad (18)$$

4.2.2 约束条件

滚动优化模型的约束条件主要包括潮流平衡约束、配电网运行安全约束、中压配电网光伏电站无功出力约束,以及中低压关联模型中的不确定性交换功率约束、交互节点电压约束。

(1) 潮流约束。针对辐射性配电网,采用支路潮流模型进行描述,其表达式为:

$$\begin{cases} V_{i,t}^2 - (K_{i,t} V_{j,t})^2 = 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 \\ I_{ij,t}^2 V_{i,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \\ P_{j,\text{PV},t} - P_{j,\text{d},t} = \sum_{k \in C(j)} P_{jk,t} - (P_{ij,t} - I_{ij,t}^2 r_{ij}) \\ Q_{j,\text{PV},t} - Q_{j,\text{d},t} = \sum_{k \in C(j)} Q_{jk,t} - (Q_{ij,t} - I_{ij,t}^2 x_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中:当支路不含 OLTC 时, $K_{i,t} = 1$ 。 P_{ij} , Q_{ij} 分别为支路 ij 的有功及无功功率; $P_{j,\text{PV}}$, $Q_{j,\text{PV}}$ 分别为节点 j 所接光伏电站注入的有功与无功功率; $P_{j,\text{d}}$, $Q_{j,\text{d}}$ 为节点 j 所接负荷。 $k \in C(j)$ 表示与节点 j 相连的所有节点构成的集合。

(2) 配电网运行安全约束。

$$\begin{cases} V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max} \\ I_{ij,t} \leq I_{ij}^{\max} \\ P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: V_i^{\max} , V_i^{\min} 分别为节点 i 电压幅值上下限,按照电网运行安全要求,除中压配电网根节点与中低压交互节点外,其他节点电压均需满足此约束。 I_{ij}^{\max} 为支路 ij 电流幅值上限; P_G^{\max} , P_G^{\min} 分别为主网联络线交换有功功率上下限。

(3) 光伏电站无功出力约束。针对专线接入变电站低压侧母线的光伏电站,其无功约束可表示为:

$$-Q_{i,\text{PV}}^{\max} \leq Q_{i,\text{PV},t} \leq Q_{i,\text{PV}}^{\max} \quad (21)$$

$$\begin{cases} Q_{i,\text{PV}}^{\max} = Q_{i,\text{SVC}}^{\max} + Q_{i,\text{inv}}^{\max} \\ Q_{i,\text{inv}}^{\max} = \min \left(\tan \varphi_{\max} P_i^{\text{RT}}, \sqrt{S_i^2 - (P_i^{\text{RT}})^2} \right) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $Q_{i,\text{PV},t}$ 为第 i 个光伏电站专线接入的光伏电站 t 时刻的无功出力值; $Q_{i,\text{SVC}}^{\max}$ 由 SVC 可调容量确定; $Q_{i,\text{inv}}^{\max}$ 为光伏逆变器可调最大无功值; P_i^{RT} 为光伏有功出力实时值; φ_{\max} 为最大功率因数角; S_i 为光伏视在功率。针对用户侧光伏电站, $Q_{i,\text{SVC}}^{\max} = 0$ 。

(4) 中低压不确定性交换功率约束。根据 3.2 小节所述,其表达式如式(8)所示。

(5) 中低压交互节点电压约束。根据 3.2 小节所述,其表达式如式(9)一式(11)所示,分情况进行约束选择。

4.3 反馈校正

4.3.1 优化目标

以光伏电站未来功率输出与滚动优化参考值偏差最小为优化目标,其表达式为:

$$\min f_4 = \sum_{t=t_0}^{t_0+M\Delta t} \sum_{i=1}^{n_{PV}} (Q_{i,PV,t}^{RT} + \Delta Q_{i,PV,t} - Q_{i,PV,t_0+\Delta T}^{ref}) + (P_{i,PV,t}^{RT} + \Delta P_{i,PV,t} - P_{i,PV,t_0+\Delta T}^{ref}) \quad (23)$$

式中: $P_{i,PV,t}^{RT}$, $Q_{i,PV,t}^{RT}$ 分别为光伏电站有功、无功出力实时值; $P_{i,PV,t_0+\Delta T}^{ref}$, $Q_{i,PV,t_0+\Delta T}^{ref}$ 分别为滚动优化有功、无功出力结果,作为反馈环节的参考值; $\Delta P_{i,PV,t}$, $\Delta Q_{i,PV,t}$ 分别为反馈校正环节待求解量。

4.3.2 预测误差模型

灰色预测理论针对多种不确定性因素构成的系统,基于历史数据,能够利用一系列平滑数据点来削弱原始数据的随机性,具有较好的预测性能。其过程为如下。

(1) 采集中压配电最新量测数据,根据光伏电站及负荷的量测值与预测值更新误差序列 $E_i^{(0)}$:

$$E_i^{(0)} = \{E_i^{(0)}(1), E_i^{(0)}(2), \dots, E_i^{(0)}(n)\} \quad (24)$$

式中: $E_i^{(0)}(k) = D_i^{act}(j) - D_i^{pre}(j)$, $\forall j = 1, \dots, n$ 。 $D_i^{act}(j)$, $D_i^{pre}(j)$ 分别为第 j 次光伏电站或负荷的量测值与预测值。则可得到一阶累加生成序列:

$$E_i^{(1)} = \{E_i^{(1)}(1), E_i^{(1)}(2), \dots, E_i^{(1)}(n)\} \quad (25)$$

式中: $E_i^{(1)}(j) = \sum_{l=1}^j E_i^{(0)}(l)$, $\forall j = 1, \dots, n$ 。

(2) 构造一阶常微分方程:

$$\frac{dE_i^{(1)}}{dt} + c_i E_i^{(1)} = d_i \quad (26)$$

解得:

$$\begin{bmatrix} c_i \\ d_i \end{bmatrix} = (\boldsymbol{\lambda}_i^T \boldsymbol{\lambda}_i)^{-1} \boldsymbol{\lambda}_i^T \mathbf{Y}_i \quad (27)$$

其中:

$$\boldsymbol{\lambda}_i = \begin{bmatrix} -\text{Avg}_i^{(1)}(2) & 1 \\ -\text{Avg}_i^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\text{Avg}_i^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}_i = \begin{bmatrix} E_i^{(0)}(2) \\ E_i^{(0)}(3) \\ \dots \\ E_i^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (28)$$

(3) 建立灰色预测模型,并得到光伏电站出力与负荷的预测误差。

$$E_i^{(1)*}(n+1) = [E_i^{(0)}(1) - d_i/c_i] e^{-c_i n} + d_i/c_i \quad (29)$$

则反馈校正预测误差模型可以表示为:

$$E_i^{(0)*} = E_i^{(1)*}(n+1) - E_i^{(1)*}(n) \quad (30)$$

4.3.3 约束条件

反馈校正模型约束条件与滚动优化阶段相同,

但需要将光伏电站出力误差 $E_{PV}^{(0)*}$ 、负荷误差 $E_{load}^{(0)*}$ 及控制量 $\Delta Q_{i,PV,t}$ 代入到相应的约束中。

5 算例分析

文中对 IEEE 33 节点系统改进的基础上进行仿真计算,验证所提的多级电压控制方法的正确性及有效性。预测域为 1 h,求解时长为次日全天 24 h,滚动优化设定的控制域为 15 min,反馈校正设定的控制周期为 5 min。滚动优化模型及反馈校正模型均在 Matlab 中 Yamlip 环境下进行程序编写,并采用 GUROBI 7.5.1 求解器进行计算^[22]。

5.1 系统参数

系统拓扑如图 5 所示,在 IEEE 33 节点原有系统基础上减少 2 条支路,并接入变压器、CB、光伏电站及 SVC。节点 1、2 间的变压器为 110 kV/10 kV 的 OLTC,其余为 10 kV/380 V 配电变压器。CB 接入组数为 4 组,每组补偿容量为 0.02 Mvar; SVC 为专线接入的光伏电站的无功补偿设备,补偿范围为 $[-0.5, 0.5]$ Mvar。节点 2~11 代表中压配电网,2 个配电变压器所带的支路,即节点 12~18、19~26 代表低压配电网。1 号节点为高压配电网节点,设置为松弛节点,其节点电压标幺值设为 1.03 p.u.,其他节点电压安全范围设为 $[0.95 \text{ p.u.}, 1.05 \text{ p.u.}]$ 。

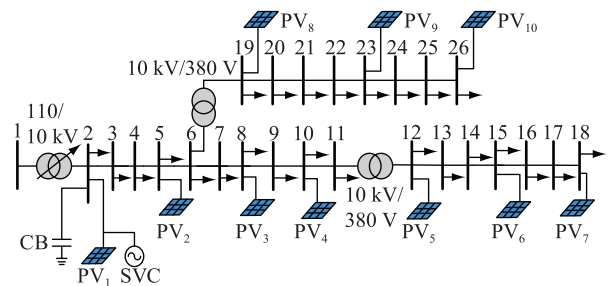


图 5 仿真系统拓扑

Fig.5 Topology of simulation system

根据相关标准,接入到中压等级配电网的光伏,其并网容量范围为 0.4~6 MW,而接入到低压配电网的户用光伏,其并网容量范围为 8~400 kW^[23]。图 5 中, PV_1 为中压配电网专线接入变电站低压侧母线的光伏电站,其并网容量为 2 MW, PV_2 、 PV_3 、 PV_4 为中压配电网用户侧光伏电站,其并网容量均为 1.5 MW,其余光伏均为低压配电网户用型光伏,其并网容量均为 0.4 MW。光伏并网点功率因数范围为 $[-0.95, 0.95]$ 。

5.2 结果分析

5.2.1 多级电压控制策略的结果分析

选取 9:00~16:00 时间段,对系统进行仿真,结果如图 6 所示。

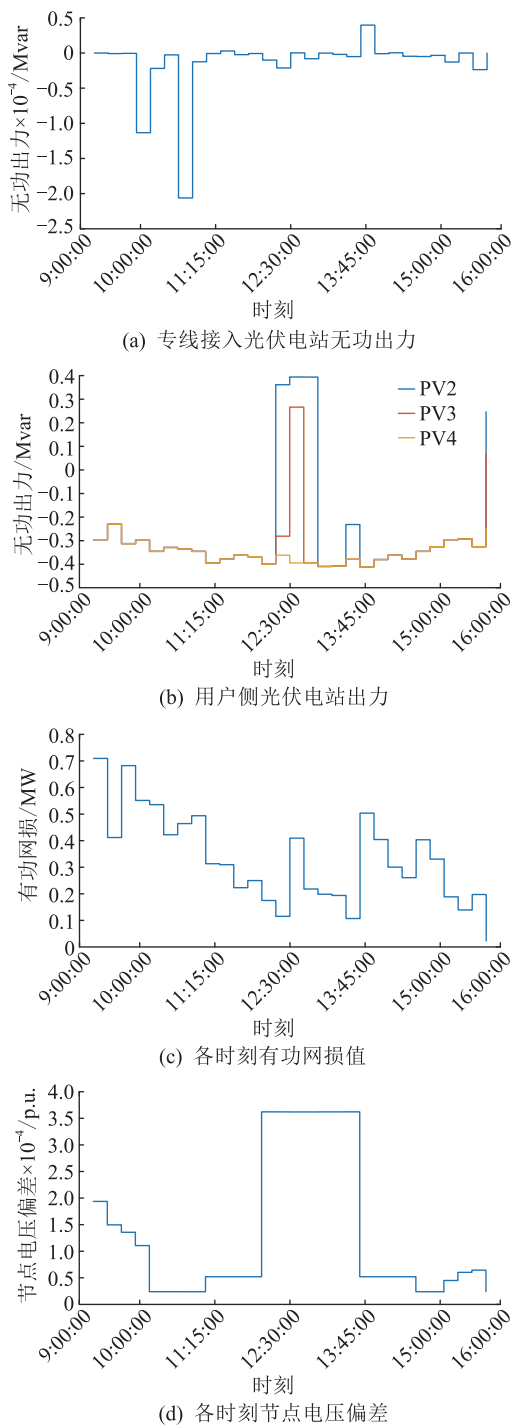


图6 9:00~16:00 时间段仿真结果

Fig.6 Simulation results during 9:00~16:00

图(a)、图(b)分别为专线接入光伏电站无功出力和用户侧光伏电站的无功出力。当节点电压水平偏高时,光伏电站发出感性无功功率,符号为-;当节点电压水平偏低时,光伏电站发出容性无功功率,符号为+。为了降低调节成本,当中压配电网末端出现电压问题时,用户侧光伏电站无功出力相比于专线接入的光伏电站无功出力较多,用于调节系统内电压水平。图(c)和图(d)分别为多级电压控制的有功网损和节点电压偏差,其中,节点偏差是

指中压配电网馈线各个节点电压与低压侧母线电压的差值的平方和。从图中可以明显发现,经过文中所提的优化控制策略,有功网损维持在比较低的水平,同时各个时刻中压配电网电压偏差很小。

5.2.2 考虑中高压关联模型的控制效果对比验证

选取 14:45~15:00 时间段,CB 投切组数为 2,在预测时间段内无动作,OLTC 档位为+1 档,在预测时刻 15:00,档位调节为 0 档;此时低压配电网处于正常运行。应用文中所提策略,图 7 比较了 15:00 增加中高压关联模型前后,中压配电网系统各个电压值分布情况。图中,考虑中高压关联简称 CMH,未考虑中高压关联简称 NCMH。

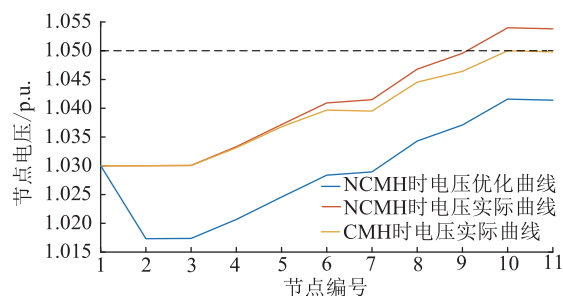


图7 15:00 时中压配电网节点电压

Fig.7 The voltage of MV distribution network at 15:00

未考虑中高压关联时,中压配电网节点电压优化曲线蓝色实线所示,各个节点均在电压约束范围内。但是实际运行时,由于未考虑到 15:00 时 OLTC 档位变化,光伏依旧按照原本的优化结果运行,从而导致末端节点 10、11 号的电压越上限。

考虑中高压关联模型后,预测 15:00 时 OLTC 动作后节点 10、11 电压越上限。由于光伏电站 PV₄ 在电气距离上接近越限节点 10、11,因此 PV₄ 容性无功出力由 0.230 1 Mvar 降低为 0.030 6 Mvar,其他光伏出力变化不大。控制后节点 10、11 电压越限事件消除,但是接近 1.05 上限值,主要是由于目标函数中无功调节成本项的存在。从仿真结果可以看出,中高压关联模型能够很好地协调中压配电网光伏电站无功出力与高压配电网离散型设备动作,避免出现离散型设备动作后中压配电网部分节点电压越限的问题。

5.2.3 考虑中低压关联模型的控制效果对比验证

选取 12:00~13:00 时间段,在该时间段内 OLTC 和 CB 无动作,OLTC 档位为+2 档,CB 投切组数为 2,中压配电网处于正常运行;由于光伏有功出力较大,低压配电网负荷较轻,整体电压偏上限运行,馈线末端节点越上限。应用本文所提策略,比较了低压配电网 1(节点 19~26)中节点 26 和低压配电网 2(节点 12~18)中节点 18 在本地控制前、本

地控制后、及多级电压控制后 3 种控制方法下电压的变化,如图 8 所示。

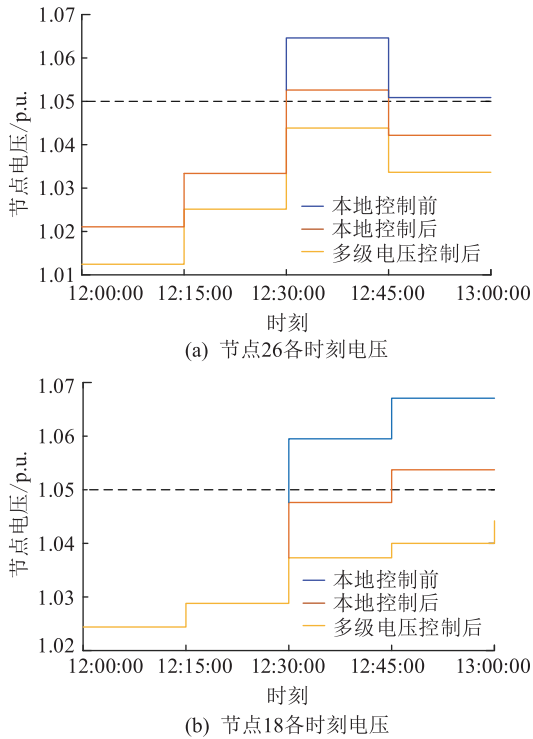


图 8 低压配电网节点电压最大值变化趋势

Fig.8 The trend of maximum voltage in LV distribution network

通过低压配电网预测信息,在 12:30~13:00 时间段,低压配电网 1 的节点 26 和低压配电网 2 的节点 18 处电压越上限,实施本地控制策略调节光伏无功进行控制。对于节点 26,在 12:30 时,由于低压配电网中光伏调节容量有限,本地控制后该节点电压依旧越限。同样的情况,对于节点 18,在 12:45 时,本地控制后其节点电压依旧越限。

多级电压控制采集 12:00~14:00 预测信息,优化 12:00~13:00 时间段光伏电站无功出力。在低压配电网仍有节点电压越限情况下,应用中低压交互节点模型,对中压配电网中交互节点 6、11 号进行约束,约束范围为 $[0.975, 1]$ 。经过该电压控制策略,一方面低压配电网电压越限情况被消除,另一方面各个时刻节点电压值均有所减少。可见,当低压配电网出现电压越限事件且利用自身调节能力无法消除时,文中所提多级电压控制可实现了中压配电网对低压配电网的支撑作用,保证了低压配电网安全运行。

6 结语

文中针对光伏高渗透率接入后的多等级电压协调控制问题,从多级多设备电压协同的角度,考

虑到配电网在运行经济性、安全性等方面的要求,基于模型预测控制,提出了一种面向配电网全局的多级电压控制策略,具备以下特点:

(1) 根据高压配电网 AVC 控制策略,建立 OLTC、CB 等离散型设备在未来时间段内的动作序列,作为多级电压控制的预测模型输入,能够有效地协调控制连续型设备离散型设备频繁,避免出现离散型设备动作后中压配电网部分节点电压越限的问题。

(2) 根据低压配电网控制策略及运行状态,分别构建中低压不确定性交换功率模型及交互节点电压模型,通过改变中低压交互节点运行状态,实现中压配电网对低压配电网的功率支撑。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2017038)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 2-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [2] LIN Chenhui, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Decentralized reactive power optimization method for transmission and distribution networks accommodating large-scale DG integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 363-373.
- [3] 傅旭, 苗淼, 李富春, 等. 青海电网光伏接纳能力研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(4): 21-25.
FU Xu, MIAO Miao, LI Fuchun, et al. Study on photovoltaic acceptance ability in qinghai power grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(4): 21-25.
- [4] 赵伟然, 汪海蛟, 李光辉, 等. 等分布式光伏并网电压和功率因数协调控制策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 20-26.
ZHAO Weiran, WANG Haijiao, LI Guanghui, et al. Voltage and power factor coordination control for distributed photovoltaic integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 20-26.
- [5] 雷涛, 曹勇, 孙晓静, 等. 计及可控负荷及分布式电源接入的配电网网架布局规划方法[J]. 陕西电力, 2017, 45(1): 17-21.
LEI Tao, CAO Yong, SUN Xiaojing, et al. Planning method for distribution network with controllable load and distributed generation[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(1): 17-21.
- [6] 怀全, 候小虎, 何良策, 等. 一种含分布式电源的中低压配电网状态估计方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 69-85.
HUAI Quan, HOU Xiaohu, HE Liangce, et al. A method of state estimation for middle voltage and low voltage distribution network with distributed generations[J]. Power System

- Protection and Control, 2018, 46(21):69-85.
- [7] 付英杰, 汪泓, 陈春, 等. 考虑分布式电源的配电网电压控制新方法[J]. 电力系统及自动化学报, 2015, 27(5):26-31. FU Yingjie, WANG Feng, CHEN Chun, et al. New method of voltage control considering distribution network containing distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2015, 27(5):26-31.
- [8] 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. CHEN Fei, LIU Dong, CHEN Yunhui. Hierarchically distributed voltage control strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9):61-67.
- [9] 刘双, 张建周, 王汉林, 等. 考虑多无功源的光伏电站两阶段无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11):120-125. LIU Shuang, ZHANG Jianzhou, WANG Hanlin, et al. Two-stage reactive power and voltage coordinated control strategy for photovoltaic station considering multiple reactive power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11):120-125.
- [10] 季玉琦, 耿光飞, 温渤婴, 等. 基于最优分割法的含DG配电网动态无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(8):2585-2593. JI Yuqi, GENG Guangfei, WEN Boying, et al. Dynamic reactive power optimization in distribution network with DG based on optimal partition[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2585-2593.
- [11] CHEN S, HU W, SU C, et al. Optimal reactive power and voltage control in distribution networks with distributed generators by fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimisation method[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(11):1096-1103.
- [12] KIM Y J, KIRTLEY J L, NORFORD L K. Reactive power ancillary service of synchronous DGs in coordination with voltage control devices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 8(2):515-527.
- [13] 蔡宇, 林今, 宋永华, 等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23):42-49. CAI Yu, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Model predictive control-based voltage control strategy in active distribution network[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23):42-29.
- [14] VALVERDE G, CUTSEM T V. Model predictive control of voltages in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4):2152-2161.
- [15] ZHAO H, WU Q, GUO Q, et al. Coordinated voltage control of a wind farm based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4):1440-1451.
- [16] SU Wencong, WANG Jinhui, ZHANG Kuilin, et al. Model predictive control-based power dispatch for distribution system considering plug-in electric vehicle uncertainty[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 106:29-35.
- [17] 董雷, 陈卉, 蒲天骄, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17):4609-4617. DONG Lei, CHEN Hui, PU Tianjia, et al. Multi-time scale dynamic optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17):4609-4617.
- [18] 张颖, 季宇, 唐云峰. 基于MPC含分布式光伏配电网有功功率-无功功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2017(21):140-146. ZHANG Ying, JI Yu, TANG Yunfeng. Coordinated control of active and reactive power for distribution network with distributed photovoltaic based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21):140-146.
- [19] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5):1397-1407. REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-timescale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5):1397-1407.
- [20] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于有功无功协调优化的主动配电网过电压预防控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9):184-191. LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Over voltage preventive control method based on active and reactive power coordinated optimization in active distribution network[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(9):184-191.
- [21] 蒋建民, 冯志勇, 刘美仪. 电力网电压无功功率自动控制系统[M]. 北京:辽宁科学技术出版社, 2010. JIANG Jianmin, FENG Zhiyong, LIU Meiyi. Automatic voltage control in power grid[M]. Beijing:Liaoning Science and Technology Press, 2010.
- [22] LOFBERG J Y. A toolbox for modeling and optimization in Matlab[C]//2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design. Taipei, China, 2004:284-289.
- [23] 光伏电站接入电网技术规定: Q/GDW 617—2011 [S]. 北京:中国电力出版社, 2011. Technical rule for photovoltaic power station connected to power grid: Q/GDW 617—2011 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.

作者简介:



韩华春

韩华春(1988),女,博士,工程师,从事电动汽车V2G技术、新能源并网关键技术研究工作(E-mail:598543427@qq.com);

窦晓波(1979),男,博士,教授,研究方向为分布式电源(储能)变流器优化控制、分布式电源高渗透配电网、分布式发电与微电网;

李强(1981),男,硕士,工程师,从事电力系统分析与可再生能源并网工作。

Multi-level voltage control in active distribution network based on model predictive control

HAN Huachun¹, DOU Xiaobo², LI Qiang¹, CHANG Limin², SHEN Lu², DU Jianxiong²

(1. Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. School of Electrical Engineering Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With more and more photovoltaic generations integrated into different voltage level distribution networks, the interaction between the various voltage levels of the distribution network is more complicated. It is a great challenge for the active distribution network to improve of system security and economy capacities. Considering the effect between different voltage levels, a multi-level voltage interaction control method for active distribution network based on model predictive control (MPC) is proposed in the paper. Considering on-load tap changers (OLTC) and shunt capacitor banks (CB) future-time action plan, a medium-high voltage association model is established. Coordinated control of continuous equipment in medium voltage distribution network and discrete equipment in high voltage distribution network is achieved. In the medium and low voltage distribution network, taking into account the uncertainty exchange power and their mutual influence, a low-middle voltage association model is established. It can realize the support of medium voltage distribution network to low voltage distribution network. Finally, a case study is carried out in Matlab and the results verify the effectiveness and feasibility of the proposed approach.

Keywords: photovoltaic; multi-level voltage control; model predictive control; feedback correction

(编辑 方晶)

(上接第 12 页)

A multi-loop model and its parameters calculation for the cable with inner screens of the track circuit

TAN Ruijuan¹, YANG Jin^{2,3}, PANG Fubing⁴, JI Jianfei⁴, ZOU Jun¹

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Tsinghua University), Beijing 100084, China; 2. Beijing National Railway Research & Design Institute of Signal & Communication Co., Ltd., Beijing 100073, China; 3. Beijing High-speed Railway Operation Control System Engineering Technology Research Center, Beijing 100073, China; 4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The digital signaling cable with inner screens is transmission channel in the high-speed railway track circuit. Its multi-loop simulation model and parameters have important significance for the research of high-speed railway track circuit. Firstly, in this paper, the multi-loop model of the digital signaling cable with inner screens is set up based on its structure characteristics and transmission path. Furthermore, the parameters of cable included capacitance, inductance, resistance are calculated based on the finite element method, including a detailed description of the boundary value problem of various parameters for calculating the finite element, the necessary calculation formula and step. Finally, taking 8-core shielded cables as an example, the simulation model is established, and the validity of the calculation method is verified by the compare between the calculated values of cable and measured values. And the established multi-loop model can be used to research signal transmission and fault diagnosis of high-speed railway track circuit.

Keywords: high-speed railway; track circuit; digital signaling cable with inner screens; finite element method

(编辑 钱悦)