

考虑有功协调优化的配电网动态电压控制

王印峰^{1,2}, 李依泽¹, 叶洪波³, 凌晓波³, 陆超¹

(1. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;
2. 电力规划设计总院, 北京 100120; 3. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要:配电网电压动态变化特征日益凸显,对配电网动态优化控制提出了新的要求。除此之外,配电网有功与无功的耦合特性也使得仅基于无功/电压的控制方法效果降低。因此,提出了一种考虑有功/无功快速协调优化的配电网动态电压控制方法,实现在秒级时间尺度内关键节点的电压恢复。首先建立配电网有功/无功控制设备动态模型,并基于模型预测控制理论建立了动态电压控制系统预测模型。设计了面向配电网电压协调控制的多目标自适应优化策略,基于配电网同步相量测量单元动态测量数据实现有功/无功控制设备出力的动态协调。仿真结果表明,该方法能够实现配电网电压波动的秒级抑制,并将目标节点电压快速无差地恢复至扰动前水平。

关键词:配电网;动态电压控制;有功/无功协调;同步相量测量单元;模型预测控制

中图分类号:TM 762

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208034

0 引言

近年来,随着分布式能源、电动汽车充电负荷等快速增长,用户供需互动的日益频繁,配电网电压动态变化特征日益凸显^[1-2]。这些随机性、波动性的源、荷会引起配电网电压的暂升/暂降。此外,在电网结构较薄弱地区,配电网内部电压的剧烈波动会引发外部电网波动^[3]。上述问题对配电网动态电压优化控制提出了新的要求。

目前,现有配电网电压调度和控制方式多沿用“分层分级式”控制体系^[4]。该体系基于远程终端单元(remote terminal unit, RTU)、配电终端单元(distribution terminal unit, DTU)等装置,测量间隔与控制周期较长。因此,现有的关于配电网电压控制的研究大多利用静态潮流模型(包括分布式控制方法^[5-8]和集中/分层控制方法^[9-12]),或建模为规划调度问题^[13]。例如,在分布式控制方面,文献[5]基于线性化 Dist-flow 模型,通过分布式优化框架对光伏逆变器进行“分钟级”调度与“实时”无功-电压下垂控制 2 个环节协调优化,其调度周期为 15~30 min。文献[6]提出分布式有功/无功协调优化方法,基于 Dist-flow 模型建立分区多目标子优化模型,采用加速交替方向乘子法协调求解,其调度周期仍为 15 min。在集中控制方面,文献[9]改进了传统配电网无功优化的二阶锥规划方法,分别考虑了配电网有功/无

功优化与三相不平衡问题。文献[10]基于灵敏度矩阵,建立含多台混合式配电变压器的无功动态优化模型。利用模型预测控制(model predictive control, MPC)进行滚动优化,但其滚动优化周期仍为分钟级。由上述文献可知,目前配电网电压优化控制间隔通常不少于 15 min,而配电网功率波动的典型时间尺度通常为几秒,无法有效应对快速波动的不平衡功率。文献[11]提出利用“集中-分布”的分层协调控制架构,进一步改善当前控制方法的快速性与协调性。在集中控制阶段,基于最优潮流在分钟级尺度上进行全局协调优化。在“分布控制”阶段,基于一致性算法进行波动抑制与控制指令快速跟踪,但仍缺乏关键节点电压快速恢复能力。

综上所述,现有配电网电压控制方法多采用稳态模型,具有较长的协调优化周期。配电网同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)的出现为动态电压控制提供了量测与控制基础,可以兼顾配电网电压控制中快速响应与协调优化需求。随着 5G 等先进通信技术的发展,未来配电网低延时可靠通信问题也将被解决^[14]。

目前基于 PMU 的配电网电压控制研究较少,主要集中在配电网监测和诊断方面。现有基于 PMU 的配电网电压控制主要是通过引入 PMU 的同步相量数据来改善电压控制。文献[15]提出一种考虑新能源高渗透率影响的电压预测控制方法,基于联络节点电压偏差实时量测建立了支持向量机预测控制模型。文献[16]提出基于光伏发电和有载调压变压器的无功潮流在线量测信息的二次电压无功协调控制策略。然而上述研究仍然在控制策略设计中采用被控设备的稳态调节模型,也仅考虑优化系统无功。

收稿日期:2021-12-09;修回日期:2022-06-09

在线出版日期:2022-08-23

基金项目:国家电网公司科技项目(5100-202117386A)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5100-202117386A)

文献[17]较早提出基于PMU量测数据的动态电压控制策略,从一定程度上证明了动态电压控制的可行性。然而上述方法同样仅考虑无功优化,未考虑配电网中存在的有功/无功控制设备的动态协调优化。

本文提出一种考虑有功/无功快速协调优化的配电网动态电压控制方法,同时兼顾快速响应与协调优化的控制效果。首先基于有功/无功控制设备动态模型,建立了动态电压控制系统模型。进而基于MPC理论,设计了配电网动态电压控制策略。基于配电网PMU动态量测数据,该方法通过多目标滚动优化和实时误差反馈补偿实现了有功/无功控制设备快速协调优化。仿真结果表明,该方法能够同时优化系统有功/无功出力,实现配电网电压波动的秒级抑制,并将目标节点电压快速无差地恢复至扰动前水平。

1 有功/无功控制设备动态模型

本文所研究的典型场景为配电网变电站某出线下的区域配电网,区域内包含区域控制中心、基于配电网PMU的实时监控网络与多种有功/无功控制设备。针对配电区域内有功/无功功率波动引起的电压快速波动^[7,10],本文基于配电网PMU动态量测,充分发挥有功/无功控制设备快速响应特性,实现秒级电压协调优化控制。

首先建立反映有功/无功控制设备动态特性的模型,并将二者统一于控制系统中。下面给出动态电压控制研究的2个基本假设条件:

1)假设配电网各有功/无功控制设备和关键负荷母线均配置了配电网PMU装置,满足各控制设备状态和配电网运行状态的实时量测与控制需求;

2)假设电压扰动过程中,系统频率维持在合理范围内,因此忽略频率对负荷出力的影响。

假设所研究的配电网区域中含有的有功/无功控制设备包括安装有本地励磁控制器与调速器的小型燃气发电机、静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)。其余控制设备也可以按照本文思路添加。上述设备已有广泛使用的动态模型^[18-20]。为降低动态电压控制计算复杂度,本文对各控制设备模型进行简化,保留与动态电压控制时间尺度近似的动态环节。下面介绍本文所采用的各控制设备的线性简化模型。

本文基于三阶发电机模型,得到带有直流励磁控制器与一阶调速器发电机线性化模型,如式(1)所示。

$$\begin{cases} \Delta \dot{E}'_q = -\frac{X_d}{T'_{d0} X'_d} \Delta E'_q + \frac{1}{T'_{d0}} \Delta V_f + \frac{V_g (X_d - X'_d) \sin \Delta \delta}{T'_{d0} X'_d} \Delta \delta \\ \Delta \dot{\omega} = -\frac{V_g (X_d - X'_d) \sin \Delta \delta}{T_j X'_d} \Delta E'_q - \frac{D}{T_j} \Delta \omega - \\ \quad \frac{V_g^2 X_q \cos(2\Delta \delta) - V_g^2 X'_d \cos(2\Delta \delta) + E'_q V_g X_q \cos \Delta \delta}{T_j X'_d X_q} \Delta \delta \\ \Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \\ \Delta \dot{V}_f = \frac{\mu_0 T_1}{T_2 T_e} \Delta V_{ref} - \frac{1}{T_e} \Delta V_f \\ \Delta \dot{x}_g = -\frac{1}{T_{2-g}} \Delta x_g + \frac{1}{RT_{2-g}} \left(\frac{T_{1-g}}{T_{2-g}} - 1 \right) (\Delta \omega - \Delta \omega_{ref}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:状态变量 $\Delta E'_q$ 、 $\Delta \omega$ 、 $\Delta \delta$ 、 ΔV_f 、 ΔV_{ref} 、 Δx_g 分别为发电机暂态电势、发电机转速、发电机功角、励磁电压、励磁电压参考值和调速器中间变量的变化量; X_d 、 X_q 、 X'_d 、 T'_{d0} 、 T_j 、 D 、 ω_0 、 V_g 分别为发电机d轴电抗、q轴电抗、d轴暂态电抗、d轴开路时间常数、发电机惯性时间常数、阻尼系数、额定转速和机端电压; T_1 、 T_2 、 T_e 、 μ_0 分别为励磁控制器的零点、极点、磁场时间常数和控制器的调节增益; $\Delta \omega_{ref}$ 、 T_{1-g} 、 T_{2-g} 、 R 分别为调速器参考转速变化量、调速器时间常数、暂态增益时间常数和功率下垂系数。励磁控制器和调速器具体模型见文献[18]。

基于SVC连续时间模型与SOFC连续时间模型,得到其线性化模型为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{b}_{SVC} = -\frac{1}{T_r} \Delta b_{SVC} + \frac{K_r}{T_r} \Delta V_{SVC_ref} \\ \Delta \dot{I}_{dc} = -\frac{\Delta I_{dc}}{T_{e_SOFC}} + \frac{S_n}{T_{e_SOFC} V_{dc}} \Delta p_{ref} \\ \Delta \dot{m} = -\frac{\Delta m}{T_{m_SOFC}} + \frac{K_m}{T_{m_SOFC}} \Delta V_{SOFC_ref} \end{cases} \quad (2)$$

式中:状态变量 Δb_{SVC} 、 ΔI_{dc} 和 Δm 分别为SVC等值导纳、SOFC电源侧等值直流电流与逆变系数的变化量; K_r 、 T_r 、 ΔV_{SVC_ref} 分别为SVC控制增益、控制时间常数和参考电压变化量; T_{e_SOFC} 、 T_{m_SOFC} 、 K_m 、 S_n 、 V_{dc} 、 Δp_{ref} 、 ΔV_{SOFC_ref} 分别为SOFC电流控制环节时间常数、换流器控制时间常数、控制增益系数、额定容量、端口电压、参考有功功率变化量和参考电压变化量。SVC与SOFC具体模型分别见文献[19-20]。

整理有功/无功可控设备的状态空间方程式(1)、(2),可得动态电压控制系统状态空间模型,如式(3)所示。

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (3)$$

式中:状态变量 $\Delta \mathbf{x}$ 、控制变量 $\Delta \mathbf{u}$ 和系数矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 具体形式分别见附录A式(A1)~(A4)。

本文选取配电网内部关键母线与配电网公共连接点(point of common coupling, PCC)处电压为控

制目标,使其保持在设定值。因此,本文令目标节点电压作为系统输出值,得到系统输出方程,如式(4)所示。

$$V_1 = C_m(t)x \quad (4)$$

式中: V_1 为作为控制目标的关键节点电压; $C_m(t)$ 为输出方程的系数矩阵; x 为各控制设备状态变量。本文基于系统网络方程,采用节点电流注入的方式建立各控制设备状态变量 x 和目标节点电压 V_1 的关系,其推导过程可参考文献[17]。在文献[17]基础上,本文采用Ward等值方法将外部高电压系统简化为1个或多个等效电流源,具体推导过程见附录A式(A5)~(A11)。

2 基于MPC的动态电压控制架构

本文基于MPC理论框架,设计了考虑有功/无功快速协调优化的配电网动态电压控制策略。其中MPC架构包括模型预测、滚动优化和误差反馈校正3个环节。所提动态电压协调控制策略各环节设计思路如图1所示。

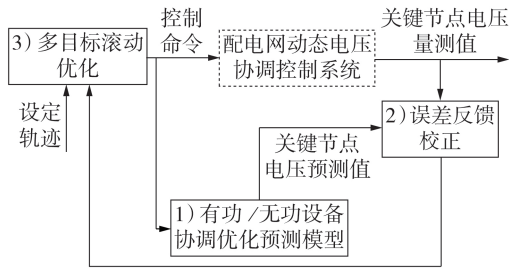


图1 基于MPC的动态电压控制框架

Fig.1 Dynamic voltage control framework based on MPC

1)建立预测模型:预测模型是MPC策略设计的基础,通过构建能够表征系统动态变化特征的模型,并根据系统当前时刻的状态、控制输入和输出信息预测未来输出。相比现代经典控制理论,MPC对模型形式没有严格要求。本文采用机理建模方法,基于有功/无功设备动态模型建立控制系统预测模型。具体推导过程将在第3节详细介绍。

2)基于实测的误差反馈校正:由于配电网结构复杂,非线性、不确定性问题显著,同时采用的有功/无功控制设备简化模型无法刻画全部模型动态特性。因此,本文在配电网PMU部署应用的基础上通过预测误差实时反馈来对预测模型输出值进行反馈校正,以降低预测模型与实际模型间、线性化模型与原非线性模型间以及由于参数误差/时变等因素导致的预测模型误差,进而避免带来的控制失效问题。

3)滚动优化:相比于传统控制基于离线设定值的方法,MPC能够充分利用PMU的动态量测信息在

每个量测点上进行滚动优化。通过滚动优化,可以解决传统离线优化方法无法解决控制对象时变等不确定性问题。本文以配电网关键母线与PCC处电压维持设定值为目标,建立有功/无功控制设备多目标协调优化模型,实现在不同控制阶段以动态优化目标求解控制指令。

3 基于MPC的动态电压控制策略

3.1 多步预测模型

下面介绍如何建立系统预测模型。在每个采样时刻,对式(3)、(4)进行离散化,得到动态电压控制系统离散时间状态空间模型,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = A_d \Delta x(k) + B_d \Delta u(k) \\ V_1(k+1) = C_d(k+1)(\Delta x(k) + x(k)) \end{cases} \quad (5)$$

式中:离散时间模型系数 A_d 、 B_d 、 $C_d(k)$ 可由连续空间模型各系数计算得到,具体见附录A式(A12)。

进一步将状态方程输出变量和状态变量组合,得到系统离散时间广义状态空间模型。由于相邻采样点时间间隔很小,可以认为在相邻采样时刻上 C_d 变化不大。广义状态空间模型如式(6)所示。

$$\begin{cases} X_s(k+1) = A_s X_s(k) + B_s \Delta u(k) \\ V_1(k) = C_s X_s(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $X_s(k+1) = [\Delta x(k+1) \ V_1(k+1)]^T$ 。 A_s 、 B_s 、 C_s 表达式为:

$$\begin{cases} A_s = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ C_d(k)A_d & I \end{bmatrix} \\ B_s = \begin{bmatrix} B_d \\ C_d(k)B_d \end{bmatrix} \\ C_s = [0 \ I] \end{cases} \quad (7)$$

式中: I 为单位阵。在每一个采样时刻,MPC需要根据未来 P 个采样时刻内的目标节点电压设定值确定控制增量。因此根据式(6)可以递推得到在预测域 P 内的系统预测模型,如式(8)所示。

$$X(k) = F_x X_s(k) + G_x \Delta U(k) \quad (8)$$

式中:预测模型状态量 $X(k)$ 、预测模型控制量 $\Delta U(k)$ 及系数矩阵 F_x 、 G_x 的表达式见附录A式(A13)。

在预测域 P 内,系统状态空间输出方程为:

$$Y(k) = F_y X(k) \quad (9)$$

式中: $Y(k)$ 为在预测域 P 内系统输出量; F_y 为输出系数矩阵, F_y 表达式见附录A式(A14)。

因此,整理式(8)、(9)可以得到:

$$Y(k) = A X_s(k) + \Phi \Delta U(k) \quad (10)$$

式中: $A = F_y F_x$; $\Phi = F_y G_x$ 。

3.2 误差反馈校正

本文所设计的反馈校正环节主要基于输出的误差补偿:当 k 时刻配电网PMU达到量测值后,根据 k

时刻预测值与量测值偏差作为后续时刻 MPC 误差的补偿值。当进行 $k+1$ 时刻控制策略优化时,对原预测模型得到的预测值进行校正,如式(11)所示。

$$\tilde{Y}(k+1)=Y(k+1)+\sigma(k)=Y(k+1)+\Omega e(k) \quad (11)$$

式中: $Y(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻原预测模型预测得到的 P 步预测值向量; $\tilde{Y}(k+1)$ 为校正后的 P 步预测值向量; $\sigma(k)$ 为基于 k 时刻模型预测值与实测值计算出的预测误差补偿项,由 k 时刻的预测误差 $e(k)$ 和校正权重向量 $\Omega=[w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_p]^T$ 计算得到。

3.3 多目标滚动优化

本文设计的动态电压控制的目标为:当配电网电压波动时,以尽可能小的控制代价将目标母线电压控制在设定值附近。针对动态电压控制过程的不同阶段,建立多优化目标并且能够对这些目标的权重进行动态调整。多目标滚动优化控制模型如式(12)所示。

$$\begin{cases} \min J(k)=w_1 J_1+w_2 J_2+w_3 J_3 \\ J_1=(\tilde{Y}(k)-Y_{\text{set}}(k))^T R_y (\tilde{Y}(k)-Y_{\text{set}}(k)) \\ J_2=\Delta U^T(k) R_{\Delta U} \Delta U(k) \\ J_3=(U(k)-U_{\text{set}})^T R_u (U(k)-U_{\text{set}}) \\ \text{s.t. } \tilde{Y}(k)=\Lambda X_s(k)+\Phi \Delta U(k)+\sigma(k) \\ X_{\text{smin}} \leq X_s(k+1) \leq X_{\text{smax}} \\ U_{\text{min}} \leq U(k) \leq U_{\text{max}} \\ \Delta U_{\text{min}} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{\text{max}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: X_{smax} 、 X_{smin} 分别为 X_s 上、下限约束; U_{max} 、 U_{min} 分别为各控制设备控制变量 $U(k)$ 上、下限约束; ΔU_{max} 、 ΔU_{min} 分别为 $\Delta U(k)$ 上、下限约束。优化目标为3个目标的加权和,这3个目标分别定义如下。

1) 目标 J_1 :使电压预测值与目标值的偏差尽可能小。由 $\tilde{Y}(k)$ 、母线电压设定值 $Y_{\text{set}}(k)$ 以及误差代价系数 R_y 所决定。

2) 目标 J_2 :使得控制过程中控制代价增量尽可能小,该目标决定了每一步控制设备的调节幅度。由 $\Delta U(k)$ 、控制增量代价系数 $R_{\Delta U}$ 所决定。通过设置相对较小的快速调节设备的增量代价系数,可以提高控制整体响应速度。

3) 目标 J_3 :使得控制过程中各设备的总体调节代价尽可能小。由 $U(k)$ 、各控制设备控制变量扰动前设定值 U_{set} 、总体调节量的代价系数 R_u 所决定。通过设置较大的快速响应设备的总体调节代价系数,可以减小其偏离扰动前设定状态的程度,为后续调节保留更多快速响应备用容量。

上述3个目标代表着动态电压不同控制阶段的控制要求。在系统扰动后初始阶段,需要系统加快恢复,因此目标 J_2 权重增加,并增加快速控制设备调

节出力;当电压恢复到一定程度后,需要保留快速响应调节裕度,因此 J_3 权重增加,并通过增加慢速设备无功出力,减少快速设备无功出力,实现无功出力动态置换。本文通过设置 w_1 、 w_2 、 w_3 这3个权重系数实现上述3个控制目标的在线自适应协调,如式(13)所示。

$$\begin{cases} w_1=1/2 \\ w_2=\tanh(20\alpha)/2 \\ w_3=[1-\tanh(20\alpha)]/2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: α 表示目标节点电压偏差恢复水平衡量标准,其计算表达式如式(14)所示。

$$\alpha=\|(Y_m(k)-Y_{\text{set}}(k))\|_2/\|Y_m(0)-Y_{\text{set}}(0)\|_2 \quad (14)$$

式中: $Y_m(k)$ 为当前母线电压量测值。上述3个目标权重随 α 变化情况见附录B表B1。

在每个时刻 k 可以求解式(12)中的优化模型得到 P 个采样时刻的控制增量序列。目前可以采用成熟优化软件中的优化算法进行高效求解。选择控制增量序列的第一个控制增量作为 k 时刻有效控制增量,如式(15)所示。

$$\begin{cases} \Delta u(k|k)=K_{\text{mpc}} \Delta U(k) \\ u(k)=u(k-1)+\Delta u(k|k) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $K_{\text{mpc}}=[I \ 0 \ \cdots \ 0]$ 。若 $u(k)$ 满足上述对控制增量和控制量的约束,则直接施加于控制系统,否则选取控制增量或控制量的上下限值。

4 算例分析

本文仿真系统基于IEEE 14节点测试系统修改得到,系统接线图见附录B图B1。将具有励磁控制器与调速器、容量为6 MW的2台小型燃气轮机分别接入节点 B_6 、 B_8 ,作为配电网中的有功/无功控制设备。除此之外,1组容量为5 MW的SOFC接入节点 B_{10} ,1台容量为2 Mvar的SVC接入节点 B_{13} 以维持配电网末端电压。选择初始电压水平最低的节点 B_9 、 B_{11} 和PCC节点 B_4 、 B_5 作为电压控制的目标节点。仿真测试和控制程序均在MATLAB/PSAT环境下实现。

为了更好地分析所提方法在应对配电网电压快速变化场景下的有效性,选择以下3个方案的测试结果进行对比分析:①方案1,就地电压控制方案,各控制设备仅进行本地调压控制,不进行协调电压控制;②方案2,仅考虑无功功率调节,未考虑有功设备及外部系统的影响,且没有考虑控制阶段多优化目标动态调整的配电网动态电压控制方案;③方案3,本文所设计考虑有功/无功设备快速协调控制、控制过程中实现多目标优化,并且考虑了外部系统影响的动态电压协调控制方案。

4.1 负荷无功需求突增场景验证

令10 kV系统中位于 B_{11} 的负荷无功需求突增0.9 Mvar。各方案电压控制效果如图2所示,图中关键节点电压为标么值。

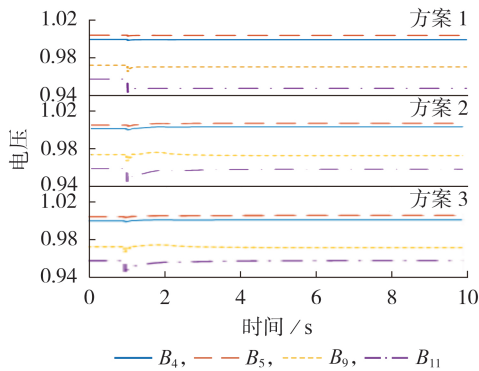


图2 无功突增场景下不同方案关键节点电压曲线

Fig.2 Voltage curves of key nodes in different schemes under scenario of sudden increase of reactive power

由图2可知,负荷突增后通过就地电压控制能够在一定程度提高母线电压。但由于缺少全局协调, B_{11} 电压只恢复到0.9501 p.u.,存在越限风险。说明就地电压控制方案虽然响应速度很快,但无法实现母线电压的准确恢复。在相同时间尺度内,方案2与方案3中系统关键节点电压均能准确恢复到扰动前稳态值,验证了本文所提动态电压控制方法的快速性与有效性。但2个方案中各控制设备出力情况有较大差异,各控制设备出力情况见图3和表1。

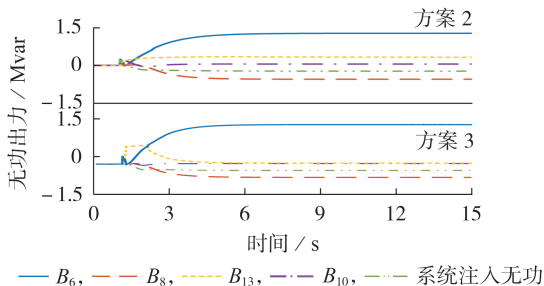


图3 无功突增场景下各控制设备无功出力情况

Fig.3 Reactive power output of each control equipment under scenario of sudden increase of reactive power

表1 无功突增场景下各控制设备有功出力情况

Table 1 Active power output of each control equipment under scenario of sudden increase of reactive power

节点	有功出力 / MW			
	方案2 (第2 s)	方案2 (第10 s)	方案3 (第2 s)	方案3 (第10 s)
B_6	0.0568	0.0062	0.1123	0.1376
B_8	-0.0019	0.0023	0.0102	-0.0231
B_{10}	0	0	0.0011	0.0078
外部系统	0.0562	0.1315	-0.0040	-0.0068

由图3可知,方案2中SVC和燃气轮机都尽可能地提供无功支撑。但在方案3中,通过多目标滚动优化,在电压动态控制初期利用SVC快速调节承担电压恢复的主要任务。在电压动态控制后期利用 B_6 处的发电机增加无功出力置换SVC的无功出力。可以看出到达新稳态时SVC无功增量基本为0,为应对后续快速电压控制保留了调节裕度。

由表1可知,由于方案2未考虑有功功率调节,配电网内产生的有功缺额主要由外部系统提供。而方案3则在电压控制过程中考虑了系统有功资源的协调,通过增加 B_6 处的发电机有功,减小 B_8 处的发电机有功,大幅降低外部系统有功注入增量,实现了电压控制中有功/无功的动态协调优化。本文所提控制方法有利于在配电网内部实现有功缺额补偿,减少了对大系统有功支撑的依赖。

4.2 负荷有功需求突增场景验证

进一步在系统有功功率变化造成电压波动场景下对比分析各控制方案有效性。令 B_{11} 并联负荷的有功需求突增50%。扰动前及扰动后各方案下关键节点电压恢复情况如表2所示(表中电压为标么值,后同)。不同方案有功出力随时间变化曲线如图4所示。

表2 各方案关键节点电压恢复情况

Table 2 Voltage recovery at key nodes of each scheme

节点	电压			
	扰动前	扰动后方案1	扰动后方案2	扰动后方案3
B_4	0.9945	0.9929	0.9902	0.9943
B_5	0.9977	0.9895	0.9936	0.9990
B_9	0.9798	0.9773	0.9770	0.9774
B_{11}	0.9602	0.9476	0.9591	0.9597

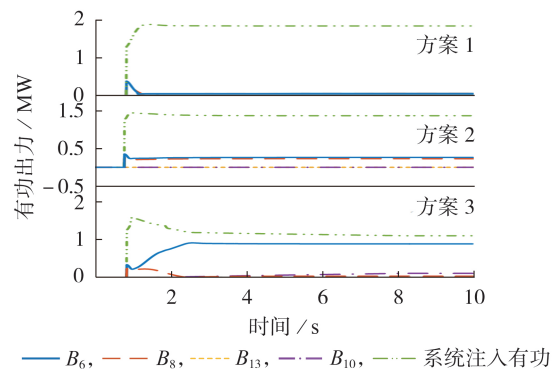


图4 有功突增场景下各控制设备有功出力情况

Fig.4 Active power output of each control equipment under scenario of sudden increase of active power

由表2与图4可知,在方案1中所有关键节点电压下降。这是由于配电网区域内部无法平衡有功缺额,有功缺额几乎全部由外部系统来平衡。对比图4中方案2与方案3的结果可知,方案2存在系统关键母线电压恢复的稳态误差。这是由于方案2没有

考虑配电网电压与有功的耦合关系,仍然主要以外系统有功注入来补偿内部有功缺额,因此PCC处电压无法恢复到稳态值。相比而言,方案3则通过协调系统有功设备增加出力,减少对外部系统有功注入的依赖,PCC处电压可恢复到稳态值。

4.3 负荷有功/无功需求突增场景验证

相比于配电网负荷有功或无功单独突增场景,有功/无功需求同时突增的场景更为常见。因此,接下来对本文所提控制方案进一步进行验证分析。令 B_{11} 负荷的有功/无功负荷需求同时突增50%。前面2个场景结果已经说明了方案2和方案3相比于方案1优势明显。因此,本节主要考虑方案2和方案3的控制效果。在负荷有功/无功同时突增场景下,扰动后2种方案下关键节点电压值如表3所示。

表3 有功/无功负荷突增场景下电压恢复情况对比

Table 3 Comparison of voltage recovery under active and reactive load surge scenarios

节点	电压		
	扰动前	扰动后方案2	扰动后方案3
B_4	0.9945	0.9748	1.0006
B_5	0.9977	0.9776	0.9972
B_9	0.9798	0.9790	0.9800
B_{11}	0.9602	0.9574	0.9546

由结果可以看出,采用方案2时,配电网内各关键节点(B_9 和 B_{11})电压基本可以恢复到稳态值,而配电网PCC处电压却低于稳态值(下降2%左右)。而本文所提出的方案3不仅能够保证系统内关键母线电压恢复到稳态设定值,并且能够维持PCC处电压,减少了对外部系统的影响。

5 结论

本文针对配电网功率波动引起的电压快速变化问题,提出了考虑有功/无功快速协调优化的配电网动态电压控制方法。基于有功/无功设备动态模型与配电网PMU动态量测数据,建立了配电网动态电压控制模型。设计了基于MPC的在线预测、多目标滚动优化和反馈校正的动态电压控制策略。最后,在多种功率扰动场景下与其他控制方案进行仿真对比。仿真结果表明,本文所设计算法能够快速协调配电网内有功/无功控制设备,实现电压波动秒级抑制并降低对外部系统的影响,满足配电网电压控制中快速响应与协调优化需求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 杨昕然,吕林,向月,等. “车-路-网”耦合下电动汽车恶劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):102-108,122.
YANG Xinran, LÜ Lin, XIANG Yue, et al. Degradation char-

ging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under “EV-road-grid” coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10):102-108, 122.

[2] 高鹏程,王蕾,李立生,等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):190-196.

GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):190-196.

[3] 陈岩,靳伟,王文宾,等. 区域储能站参与扰动平抑的配电网多时间尺度自律策略[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(7):134-143.

CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, et al. Regional energy storage stations participate in disturbance stabilization of a distribution network multi-time-scale self-discipline operation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7):134-143.

[4] 王彬,郭庆来,周华锋,等. 南方电网省地三级自动电压协调控制系统研究及应用[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):208-215.

WANG Bin, GUO Qinglai, ZHOU Huafeng, et al. Applications of coordinated automatic voltage control integrated for regional, provincial and prefectural control centers in China southern power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):208-215.

[5] 李培帅,吴在军,张错,等. 主动配电网分布式混合时间尺度无功/电压控制[J]. 电力系统自动化,2021,45(16):160-168.

LI Peishuai, WU Zaijun, ZHANG Cuo, et al. Distributed hybrid-timescale voltage/var control in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16):160-168.

[6] 寇凌峰,吴鸣,李洋,等. 主动配电网分布式有功无功优化调控方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):1856-1865.

KOU Lingfeng, WU Ming, LI Yang, et al. Optimization and control method of distributed active and reactive power in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6):1856-1865.

[7] 王泉,何怡刚,马恒瑞,等. 考虑规模化储能的配电网电压分布式控制[J]. 电力自动化设备,2022,42(2):25-30,55.

WANG Xiao, HE Yigang, MA Hengrui, et al. Distributed voltage control of distribution network considering large-scale energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2):25-30, 55.

[8] 姜涛,张东辉,李雪,等. 含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):102-109,125.

JIANG Tao, ZHANG Donghui, LI Xue, et al. Distributed optimal control of voltage in active distribution network with distributed photovoltaic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):102-109, 125.

[9] 徐添锐,丁涛,李立,等. 适应三相不平衡主动配电网无功优化的二阶锥松弛模型[J]. 电力系统自动化,2021,45(24):81-88.

XU Tianrui, DING Tao, LI Li, et al. Second-order cone relaxation model adapting to reactive power optimization for three-phase unbalanced active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24):81-88.

[10] 高荣,寇鹏,梁得亮,等. 含混合式配电变压器的主动配电网电压鲁棒模型预测控制[J]. 中国电机工程学报,2020,40(7):2081-2090,2388.

GAO Rong, KOU Peng, LIANG Deliang, et al. Robust model predictive control for the voltage regulation in active distribution networks with hybrid distribution transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7):2081-2090, 2388.

- [11] 蔡永翔,唐巍,张博,等. 适应高比例户用光伏的中低压配电网集中-分布式协调控制[J]. 中国电机工程学报,2020,40(15):4843-4854.
CAI Yongxiang,TANG Wei,ZHANG Bo,et al. Centralized-distributed multi-objective coordinated control for MV and LV distribution networks adapting to high-proportion residential PV units[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(15):4843-4854.
- [12] 张江林,庄慧敏,刘俊勇,等. 分布式储能系统参与调压的主动配电网两段式电压协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):15-21,29.
ZHANG Jianglin,ZHUANG Huimin,LIU Junyong,et al. Two-stage coordinated voltage control scheme of active distribution network with voltage support of distributed energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):15-21,29.
- [13] 葛乐,张伟,严锋,等. 基于自适应模型预测控制的柔性互联配电网优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):15-23.
GE Le,ZHANG Wei,YAN Feng,et al. Optimal scheduling of flexible interconnected distribution network based on adaptive model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(6):15-23.
- [14] 张宁,杨经纬,王毅,等. 面向泛在电力物联网的5G通信:技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报,2019,39(14):4015-4025.
ZHANG Ning,YANG Jingwei,WANG Yi,et al. 5G communication for the ubiquitous Internet of Things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(14):4015-4025.
- [15] SU H,LIU C. An adaptive PMU-based secondary voltage control scheme[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(3):1514-1522.
- [16] SEYEDI Y,KARIMI H. Coordinated protection and control based on synchrophasor data processing in smart distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(1):634-645.
- [17] CUI T,SHEN Y,ZHANG B,et al. PMUs-based voltage control of isolated power systems with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(3):1198-1211.
- [18] KUNDUR P,BALU N J,LAUBY M G. Power system stability and control[M]. New York,USA:McGraw-Hill,1994.
- [19] KESKES S,SALLEEM S,CHRIFI-ALAOUI L,et al. Nonlinear coordinated passivation control of single machine infinite bus power system with static var compensator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2021,9(6):1557-1565.
- [20] SAIDABADI M,ABEDI M,NAFISI H,et al. Small signal stability improvement via coordination of PSS's and SOFC power conditioner by PSO algorithm[C]//2019 International Power System Conference. Tehran,Iran:IEEE,2019:557-564.

作者简介:



王印峰

王印峰(1992—),男,工程师,博士,主要研究方向为配电网同步相量测量技术、电力系统分析与控制(E-mail: yfwang@eppei.com);

李依泽(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: lyz9512@foxmail.com)。

(编辑 王欣竹)

Dynamic voltage control of distribution network considering coordinated optimization of active power

WANG Yinfeng^{1,2}, LI Yize¹, YE Hongbo³, LING Xiaobo³, LU Chao¹

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment,

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China;

3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The dynamic characteristics of distribution network voltage are becoming more and more prominent, which puts forward new requirements for dynamic optimal control of distribution network. In addition, the coupling characteristics of active and reactive power in the distribution network also make the control method only based on reactive power/voltage less effective. Therefore, a dynamic voltage control method for distribution network based on fast coordinated optimization of active and reactive power is proposed to achieve voltage recovery at key nodes within second-level time scale. Firstly, the dynamic models of the active and reactive power control equipment of the distribution network are established, and the prediction model of the dynamic voltage control system is established based on the model prediction control theory. A multi-objective adaptive optimization strategy for distribution network voltage coordination control is designed to achieve dynamic coordination of active and reactive power control equipment output based on dynamic measurement from the phasor measurement unit (PMU) of the distribution network. Simulative results show that the method can achieve second-level suppression of voltage fluctuation in the distribution network and restore the target node voltage to the pre-disturbance level quickly and without error.

Key words: distribution network; dynamic voltage control; coordination of active and reactive power; phasor measurement unit; model predictive control

附录 A

文中式(3)状态变量 $\Delta \mathbf{x} = [\Delta \mathbf{E}'_q \Delta \delta \Delta \omega \Delta \mathbf{V}_f \Delta \mathbf{x}_g \Delta \mathbf{b}_{\text{SVC}} \Delta \mathbf{I}_{\text{dc}} \Delta \mathbf{m}]^T$ ；控制变量 $\Delta \mathbf{u} = [\Delta \mathbf{V}_{\text{ref}} \Delta \omega_{\text{ref}} \Delta \mathbf{V}_{\text{SVC_ref}} \Delta \mathbf{p}_{\text{ref}} \Delta \mathbf{V}_{\text{SOFC_ref}}]^T$ ； $\Delta \mathbf{E}'_q$ 、 $\Delta \omega$ 、 $\Delta \delta$ 、 $\Delta \mathbf{V}_f$ 、 $\Delta \mathbf{x}_g$ 分别为系统内所有发电机状态变量组成的列向量； $\Delta \mathbf{b}_{\text{SVC}}$ 、 $\Delta \mathbf{I}_{\text{dc}}$ 和 $\Delta \mathbf{m}$ 为统内所有 SVC 和 SOFC 状态变量组成的列向量； $\Delta \mathbf{V}_{\text{ref}}$ 和 $\Delta \omega_{\text{ref}}$ 为系统内所有发电机控制变量组成的列向量； $\Delta \mathbf{V}_{\text{SVC_ref}}$ 、 $\Delta \mathbf{p}_{\text{ref}}$ 和 $\Delta \mathbf{V}_{\text{SOFC_ref}}$ 为统内所有 SVC 和 SOFC 状态变量组成的列向量。

状态变量所对应的系数矩阵 $\mathbf{A}$ 可表示为：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_g & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{\text{SVC}} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_{\text{SOFC}} \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

式中： $\mathbf{A}_g = \text{diag}[\mathbf{A}_{g1}, \dots, \mathbf{A}_{gn_g}]$ ， $\mathbf{A}_{\text{SVC}} = \text{diag}[\mathbf{A}_{\text{SVC}1}, \dots, \mathbf{A}_{\text{SVC}n_{\text{svc}}}]$ ， $\mathbf{A}_{\text{SOFC}} = \text{diag}[\mathbf{A}_{\text{SOFC}1}, \dots, \mathbf{A}_{\text{SOFC}n_{\text{sofc}}}]$ 。 n_g 、 n_{svc} 和 n_{sofc} 分别表示系统内发电机、SVC 和 SOFC 的数量。其中 $\mathbf{A}_{gi}$ 、 $\mathbf{A}_{\text{SVC}i}$ 、 $\mathbf{A}_{\text{SOFC}i}$ 表达式分别如式(A2)所示。

$$\mathbf{A}_{gi} = \begin{bmatrix} -\frac{X_{di}}{T'_{d0i} X'_{di}} & 0 & -\frac{V_{gi} \sin \Delta \delta_i (X_{di} - X'_{di})}{T'_{d0i} X'_{di}} & 0 & 0 \\ -\frac{V_{gi} \sin \Delta \delta_i (X_{di} - X'_{di})}{T_{ji} X'_{di}} & -\frac{D_i}{T_{ji}} & \frac{-V_{gi} (V_{gi} X'_{di} \cos 2\Delta \delta_i - V_{gi} X_{qi} \cos 2\Delta \delta_i + E'_{qi} X_{qi} \cos \Delta \delta_i)}{T_{ji} X'_{di} X_{qi}} & 0 & \frac{1}{T'_{d0i}} \\ 0 & 0 & \omega_{g0i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{2i}} & \frac{1}{R_i T_{2i}} \left(\frac{T_{li}}{T_{2i}} - 1 \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ei}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{\text{SVC}i} = -\frac{1}{T_{ri}}, \quad \mathbf{A}_{\text{SOFC}i} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{e_SOFCi}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{m_SOFCi}} \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

控制变量所对应的系数矩阵 $\mathbf{B}$ 为：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_g & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_{\text{SVC}} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_{\text{SOFC}} \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

式中： $\mathbf{B}_g = \text{diag}[\mathbf{B}_{g1}, \dots, \mathbf{B}_{gn_g}]$ ， $\mathbf{B}_{\text{SVC}} = \text{diag}[\mathbf{B}_{\text{SVC}1}, \dots, \mathbf{B}_{\text{SVC}n_{\text{svc}}}]$ ， $\mathbf{B}_{\text{SOFC}} = \text{diag}[\mathbf{B}_{\text{SOFC}1}, \dots, \mathbf{B}_{\text{SOFC}n_{\text{sofc}}}]$ 。其中 $\mathbf{B}_{gi}$ 、 $\mathbf{B}_{\text{SVC}i}$ 、 $\mathbf{B}_{\text{SOFC}i}$ 表达式分别如式(A4)所示。

$$\mathbf{B}_{gi} = \begin{bmatrix} \frac{K_{0i}T_{1i}}{T_{2i}T_{ei}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_iT_{2_gi}}(1 - \frac{T_{1_gi}}{T_{2_gi}}) \\ \frac{K_{0i}T_{1i}}{T_{2i}T_{ei}T_{d0i}} & 0 \\ \frac{T_{1_gi}}{T_{2_gi}R_{_gi}T_{ji}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{SVCi} = \frac{K_{ri}}{T_{ri}}, \mathbf{B}_{SOFCi} = \begin{bmatrix} \frac{S_n}{T_{e_SOFCi}V_{dc}} & 0 \\ 0 & \frac{K_{mi}}{T_{m_SOFCi}} \end{bmatrix} \quad (A4)$$

本文采用 Ward 等值方法，基于 PMU 实时量测在配电网公共连接点处将外部高电压系统简化为一个或多个等效电流源，如式(A5)所示。

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}}_{BB} & \mathbf{Y}_{BI} \\ \mathbf{Y}_{IB} & \mathbf{Y}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_B \\ \dot{\mathbf{V}}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_B \\ \dot{\mathbf{I}}_I \end{bmatrix} \quad (A5)$$

式中： $\mathbf{Y}_{BI}$ 为耦合节点和配电网内部系统之间的导纳矩阵； $\mathbf{Y}_{II}$ 为配电网系统内部导纳矩阵； $\dot{\mathbf{V}}_B$ 和 $\dot{\mathbf{V}}_I$ 分别为 PCC 节点电压和配电网内部节点电压； $\dot{\mathbf{I}}_I$ 为内部节点注入电流； $\tilde{\mathbf{Y}}_{BB}$ 为外部系统在 PCC 点处的等值导纳矩阵，由外部系统等值得到。

根据控制设备和响应对象重新排列(A5)，建立系统节点电流注入模型如下：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{I}_l \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{gl} & \mathbf{Y}_{gc} \\ \mathbf{Y}_{lg} & \mathbf{Y}_{ll} & \mathbf{Y}_{lc} \\ \mathbf{Y}_{cg} & \mathbf{Y}_{cl} & \mathbf{Y}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_g \\ \mathbf{V}_l \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} \quad (A6)$$

式中：左侧向量各元素 $\mathbf{I}_g$ 、 $\mathbf{I}_l$ 和 $\mathbf{I}_c$ 分别为控制设备、负荷和联络节点注入电流，右侧向量各元素 $\mathbf{V}_g$ 、 $\mathbf{V}_l$ 和 $\mathbf{V}_c$ 分别为各节点的电压。采用高斯消去方法消除联络节点，得到只保留控制设备节点和负荷节点的网络方程：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{I}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{GG} & \mathbf{Y}_{GL} \\ \mathbf{Y}_{LG} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_g \\ \mathbf{V}_l \end{bmatrix} \quad (A7)$$

根据各控制设备与负荷节点的接口方程可得到系统等值导纳矩阵：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{g_eq} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{GG} + \mathbf{Y}_{g-g} & \mathbf{Y}_{GL} \\ \mathbf{Y}_{LG} & \mathbf{Y}_{LL} + \mathbf{Y}_{l-l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{gxy} \\ \mathbf{V}_{lxy} \end{bmatrix} \quad (A8)$$

式中： $\mathbf{I}_{g_eq} = \mathbf{Y}_E \mathbf{x}$ 表示各控制设备的等效注入电流。 $\mathbf{Y}_E$ ， $\mathbf{Y}_{g-g}$ 和 $\mathbf{Y}_{l-l}$ 分别为各控制设备等值可控电流源的比例系数，等值自导纳矩阵和负荷自导纳矩阵。基于高斯消去方法，得到负荷电压与状态变量 $\mathbf{x}$ 之间的关系：

$$\mathbf{V}_{lxy} = - \left[(\mathbf{Y}_{LL} + \mathbf{Y}_{l-l}) - \mathbf{Y}_{LG} (\mathbf{Y}_{GG} + \mathbf{Y}_{g-g})^{-1} \mathbf{Y}_{GL} \right]^{-1} \mathbf{Y}_{LG} (\mathbf{Y}_{GG} + \mathbf{Y}_{g-g})^{-1} \mathbf{Y}_E \mathbf{x} = \mathbf{C}(t) \mathbf{x} \quad (A9)$$

式中： $\mathbf{V}_{lxy}$ 为负荷端电压的 x-y 坐标表达形式，基于 PMU 量测得到的负荷母线电压相角可以避免求均方根运算，保留了原模型的线性特征。

$$\mathbf{V}_l = \mathbf{C}_m(t) \mathbf{x} \quad (A10)$$

式中： $\mathbf{V}_l = [\mathbf{V}_{l1}, \dots, \mathbf{V}_{lm_l}]^T$ ， m_l 为系统内负荷数量。 $\mathbf{C}_m(t)$ 各行元素为 $\mathbf{c}_m$ ：

$$\mathbf{c}_m = \begin{cases} \left[c_{(2i-1),1}, \dots, c_{(2i-1),m_l} \right]_{(2i-1)} / \cos \theta_{li} & \text{if } \cos \theta_{li} > 0.5 \\ \left[c_{(2i),1}, \dots, c_{(2i),m_l} \right]_{(2i)} / \sin \theta_{li} & \text{else} \end{cases} \quad (A11)$$

式中： θ_{li} 为节点电压相角。

文中式(5)离散时间模型系数 $\mathbf{A}_d$ 、 $\mathbf{B}_d$ 、 $\mathbf{C}_d(k)$ 可由连续空间模型各系数计算得到，如(A12)所示：

$$\begin{cases} A_d = e^{AT_s}, B_d = \int_0^{T_s} e^{AT_s} B dt \\ C_d(k) = C_m(kT_s) \end{cases} \quad (A12)$$

式中： T_s 为采样时间间隔。

式(8)中 $X(k)$ 、 $\Delta U(k)$ 、 F_x 和 G_x 的表达式具体见如式(A13)所示：

$$\begin{aligned} X(k) &= \begin{bmatrix} X_s(k|k) \\ X_s(k+1|k) \\ X_s(k+2|k) \\ \vdots \\ X_s(k+P-1|k) \end{bmatrix}, \Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \Delta u(k+2|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+P-1|k) \end{bmatrix} \\ F_x &= \begin{bmatrix} A_s \\ A_s^2 \\ \vdots \\ A_s^P \end{bmatrix}, G_x = \begin{bmatrix} B_s & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ A_s B_s & B_s & 0 & \cdots & 0 \\ A_s^2 B_s & A_s B_s & B_s & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_s^{P-1} B_s & A_s^{P-2} B_s & A_s^{P-3} B_s & \cdots & \sum_{i=0}^{P-M} A_s^i B_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (A13)$$

式中： $X_s(k+1|k)$ 和 $\Delta u(k+1|k)$ 别为在 k 时刻对 $k+1$ 时刻 X_s 和 Δu 的预测值。

式(9)中 F_y 的表达式具体见如式(A14)所示：

$$F_y = \begin{bmatrix} C_s & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & C_s & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C_s \end{bmatrix} \quad (A14)$$

附录 B

表 B1 目标权重系数随电压恢复水平变化情况

Table B1 Variation of weighting factors with voltage recovery

系数	$\alpha = 0$	$\alpha = 2.75\%$	$\alpha = 10\%$	$\alpha = 100\%$
w_1	0.5	0.5	0.5	0.5
w_2	0	0.25	0.48	0.5
w_3	0.5	0.25	0.02	0

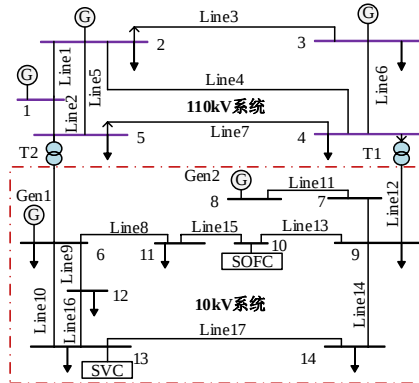


图 B1 IEEE 14 节点 110 kV/10 kV 测试系统

Fig.B1 IEEE 14-bus 110 kV/10 kV test system