2

Vol.37 No.4 Apr. 2017

计及网络拓扑下微电网有功调节 对电压控制的适应性分析

张 忠1,王建学1,刘世民2

(1. 西安交通大学 电气工程学院 陕西省智能电网重点实验室,陕西 西安 710049;2. 北京北変微电网技术有限公司,北京 100093)

摘要:由于微电网电气联系紧密,且低压线路阻抗比较大,其电压水平不仅与无功功率相关,也与有功功率密 切相关。为此,建立了节点电压与有功功率的关系模型,推导了有功-电压灵敏度矩阵。针对微电网中电源逆 变器一次电压控制的调节能力有限等问题,提出了一种微电网二次电压模糊控制策略。通过节点有功-电压 灵敏度建模,考虑了网络拓扑的影响;基于模糊控制理论,建立了通过调节有功功率进行微电网实时电压控 制模型,丰富了微电网电压控制的手段。算例分析表明:当微电网中线路电阻与电抗之比较大时,各节点电压 受有功功率变化的影响较大。应对实时功率波动引起的电压偏离,除传统的无功控制策略之外,通过调节分 布式电源的有功功率,也可以有效地将各节点电压控制在允许范围内,从而提高微电网的电压质量。

关键词: 微电网; 电压控制; 网络拓扑; 灵敏度分析; 模糊控制 中图分类号: TM 72 文献标识码: A D

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.004

0 引言

微电网是由分布式电源、储能设备、负荷、能量 管理系统等组成的具有一定自治能力的系统。目前 微电网中电压的控制方法通常参照传统电网,即通 过逆变器的无功-电压下垂特性进行控制,并可以进 一步调节各无功源的出力,实现微电网中电压的无 差调节^[1-2]。除了利用具有无功调节能力的分布式电 源外,工程中也通过增加无功补偿器等设备来改善 微电网的电能质量。然而,实际微电网工程中的电 压等级较低,传输线路的阻抗比一般较大,使得微电 网中的各母线电压受有功功率的影响也较大^[3]。文 献[4]提出了一种配电网的无功优化控制方法,模型 中考虑了有功潮流对节点电压的影响。因此,在无 功功率调节达到极限或仍需保留一定无功安全裕量 的前提下,也可通过调节有功功率对微电网中的电 压进行快速有效控制。

微电网的电压、频率无差控制既可采用分布式 的控制结构,也可采用集中式的控制结构。文献[5] 提出了一种考虑电源边际成本的微电网分布式控制 方法。文献[6-7]基于多智能体结构,提出了微电网 的分布式控制策略,分布式控制是由多个分布在不 同区域的智能体通过协作达到一定的控制目标。文 献[6]建立了基于分布式控制的二次控制模型,各智 能体仅根据本节点与相邻节点的信息对本节点电源 出力进行调节,通过各智能体的协作控制可将各节 点电压、频率控制在参考值附近;文献[7]进一步改 善了分布式电源间无功分配策略,将微电网中各节 点电压控制在允许范围内,并降低了网损。然而,分 布式控制策略需要各智能体进行协作控制,故要求 分布式算法具有较好的收敛性和稳定性。文献[8-9] 研究了微电网的集中控制方法,通过引入与电压和 频率偏差有关的比例积分环节,平移各逆变器的下 垂特性曲线,从而使系统的电压和频率恢复至额定 值。文献[10]针对电压不对称问题提出了一种补偿 控制策略,由中央控制器向各分布式电源的逆变器 下达控制指令,减小了微电网并网点电压的不对称 程度。

目前,微电网二次控制策略的研究主要是对汇 流母线的电压进行控制,而较少考虑微电网拓扑结构。为此,本文提出了考虑微电网拓扑结构的实时 电压控制策略。微电网的电压等级一般较低,传输 线路的阻抗比较大,电压-有功灵敏度因子与电压-无功灵敏度因子的大小相当、甚至大于后者,使得微 电网中的各母线电压受有功功率的影响也较大。传 统配电网中,一般没有有功电源,主要由无功设备进 行电压调节,且调节成本较高;而微电网中,有功电 源距离负荷较近可直接参与电压调节,无需增加额 外设备。

综上所述,作为传统无功-电压控制方法的补充,本文研究了微电网中有功功率对节点电压的调 节作用。在一次控制过程完成后,基于电压-有功灵

收稿日期:2016-04-06;修回日期:2017-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577146);陕西省自然 科学基础研究计划(2016JM5072)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51577146) and Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2016JM5072)

敏度因子,对分布式电源的有功出力进行调整,提高 微电网的电能质量水平或安全裕度。由于电压--功 率灵敏度因子与网络拓扑密切相关,因此电压--有功 灵敏度因子可有效反映网络拓扑的影响。考虑到微 电网中分布式电源靠近用电负荷,电源出力的变化 直接影响到负荷节点的电压水平,故本文在电压控 制策略建模中考虑了负荷静态电压特性。最后,通 过算例分析验证了所提策略的有效性。

1 微电网的实时电压控制策略

根据控制的时间尺度与作用的不同,可将微电 网的运行控制分为一次控制和二次控制 2 个层 次[2,11]。微电网中各分布式电源(包括储能设备)主 要通过电压源逆变器 VSI(Voltage Source Inverter)接 入系统。采用恒压/恒频控制(V/f控制)或下垂控 制(Droop 控制)策略[12-13]的电源能够自动平衡微电 网中的功率波动,称为一次控制[14]。一次控制属于 分布式控制结构,由逆变器的电压、电流环节及下垂 控制环节实现各分布式电源输出功率的控制,包 括跟踪上层下发的控制指令与自动平衡微电网中出 现的瞬时功率波动。主从控制模式下的微电网,主 电源采用 V/f 控制策略平衡瞬时功率波动:对等控 制模式下的微电网,各分布式电源根据下垂特性分 摊瞬时功率波动。一次控制调节过程将引起微电网 的公共连接点 PCC(Point of Common Coupling)或 主电源的出力偏离计划运行点,或使微电网的频率、 电压发生偏离,该调节过程类似于大电网的有差调 节。因此,需要进行二次电压或频率控制,使微电网 达到一个新的安全运行点[15]。

微电网的二次控制类似于大电网的无差调节, 当负荷或新能源电源出力波动较大时,一次控制过 程将导致系统运行点发生较大偏离,甚至偏离允许 的安全范围。因此,需要通过二次控制,对分布式电 源、储能出力进行调整,使各节点电压恢复到安全运 行范围内,提高电能质量;或将 PCC 的功率调整到 计划值附近,提高微电网运行的安全裕度。

微电网中电压问题较为突出,且分布式电源距 离用电负荷较近,使得电源出力的变化将直接影响 到负荷电压水平,因此增加调压手段、提高电压调节 效率对微电网的运行意义重大;同时,微电网中风 电、光伏的比重较大,且接近单位功率因数运行,其 无功调节范围较小,一定程度上限制了无功-电压调 节的手段。为此,本文将根据微电网的特性,从二次 控制的层面上提出一种基于有功-电压灵敏度因子 的实时电压控制策略,作为无功-电压调节手段的补 充,进一步改善微电网的电能质量。其采用集中式 控制结构,即由微电网的中央控制器完成模糊推理 决策过程,获得有功控制指令,并通过微电网中的通 信系统将控制指令下发给各微源。然后,由各微源 的本地控制器对下发的控制指令进行跟踪控制。各 微源一般通过电力电子变换器接入微电网,能够快速 跟踪调度指令(毫秒级)^[16],可以满足控制的实时性 要求。

2 基于电压-有功灵敏度的电压控制模型分析

本节基于交流潮流方程,通过灵敏度分析建立 微电网节点电压与有功功率之间的关系模型。

2.1 电压-有功灵敏度分析

节点潮流平衡方程式如下:

$$P_{G_{i}} = P_{L_{i}} + P_{i} = P_{L_{i}} + U_{i} \sum_{j=1}^{N} U_{j} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$
(1)

$$Q_{Gi} = Q_{Li} + Q_i = Q_{Li} + U_i \sum_{j=1}^{N} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

其中, $i=1,2,...,N;P_{Gi}$ 、 P_{Li} 、 P_i 分别为节点i的电源输出的、负荷消耗的、注入系统的有功功率; Q_{Gi} 、 Q_{Li} 、 Q_i 分别为节点i的电源输出的、负荷消耗的、注入系统的无功功率; U_i 、 U_j 分别为节点i、j的电压幅值; θ_{ij} 为节点i与j之间的电压相位差。

传统处理方法中,一般忽略负荷静态电压特性, 故非线性的潮流方程式求解可以转换为如下矩阵表 达式:

 $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P / \partial \theta & \partial P / \partial U \\ \partial Q / \partial \theta & \partial Q / \partial U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix}$ (3) 其中, J 为传统潮流方程的雅可比矩阵。在潮流收敛 处的雅可比矩阵的物理意义为:系统各节点注入功 率与系统节点电压幅值、相角之间的线性关系。式 (3)中与电压相关的偏导数具体如下:

 $\partial P_i / \partial U_j = U_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \neq j$ (4)

 $\partial Q_i / \partial U_j = U_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \neq j$ (5)

在式(4)、(5)中, θ_{ij} 的取值一般较小,故 cos θ_{ij} 的 取值接近于 1,sin θ_{ij} 的取值接近于 0。高压输电网 络中 $G_{ij} \ll B_{ij}$,使得 $\partial P_i / \partial U_j$ 远小于 $\partial Q_i / \partial U_j$,因此在大 规模电力系统中,节点电压主要受无功功率的影响。

然而,这个规律在微电网中并不成立。微电网的低压支路常有 $G_{ij} > B_{ij}$,且 sin θ_{ij} 项仍然较小,此时,式(4)中 $U_i G_{ij} \cos \theta_{ij}$ 的绝对值将大于式(5)中的 - $U_i B_{ij} \cos \theta_{ij}$ 的绝对值,使得 $\partial P_i / \partial U_j$ 的值往往大于 $\partial Q_i / \partial U_j$ 的值。例如,本文算例中某运行状态下节点 4 电压对本节点注入系统的有功功率的灵敏度为 0.263,对注入系统的无功功率的灵敏度为 0.094,前 者约为后者的 2.8 倍。因此,微电网中的节点电压除 了受到无功功率的影响之外,还受到有功功率的显 著影响,下文的算例分析也验证了上述结论。

当考虑负荷的静态电压特性时,根据式(1)、(2)

可将传统雅可比矩阵扩展为:

 $\boldsymbol{J}^{+} = \begin{bmatrix} \partial \boldsymbol{P} / \partial \boldsymbol{\theta} + \partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{L}} / \partial \boldsymbol{\theta} & \partial \boldsymbol{P} / \partial \boldsymbol{U} + \partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{L}} / \partial \boldsymbol{U} \\ \partial \boldsymbol{Q} / \partial \boldsymbol{\theta} + \partial \boldsymbol{Q}_{\mathrm{L}} / \partial \boldsymbol{\theta} & \partial \boldsymbol{Q} / \partial \boldsymbol{U} + \partial \boldsymbol{Q}_{\mathrm{L}} / \partial \boldsymbol{U} \end{bmatrix}$ (6)

其中, $\partial P_L / \partial \theta_{\lambda} \partial Q_L / \partial \theta$ 和 $\partial P_L / \partial U_{\lambda} \partial Q_L / \partial U$ 分别为 节点负荷对电压相角、幅值的偏导,其可由负荷的静 态电压特性获得。

负荷的静态特性模型是指其消耗的有功、无功 功率与系统电压、频率之间的函数依赖关系。考虑 电压影响的负荷静态特性模型常用二次函数形式^[17] 表示,如式(7)、(8)所示。

$$P_{\rm L}(U) = P_{\rm LN}[a_1(U/U_{\rm N})^2 + a_2(U/U_{\rm N}) + a_3]$$
(7)

 $Q_{L}(U) = Q_{LN}[b_{1}(U/U_{N})^{2}+b_{2}(U/U_{N})+b_{3}]$ (8) 其中, P_{LN} , Q_{LN} 分别为额定电压 U_{N} 水平下的有功、无 功负荷值; a_{1} 、 b_{1} 为恒阻抗负荷所占的比例; a_{2} 、 b_{2} 为 恒电流负荷所占的比例; a_{3} 、 b_{3} 为恒功率负荷所占的 比例。

将式(7)、(8)代入式(6)即可得到扩展后的雅可 比矩阵 **J**⁺,并称之为广义雅可比矩阵^[18]。用 **J**⁺ 替换 式(3)中的 **J** 并求逆,可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \boldsymbol{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}^{+} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{P} \\ \Delta \boldsymbol{Q} \end{bmatrix} = \boldsymbol{S} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{P} \\ \Delta \boldsymbol{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}_{11} & \boldsymbol{S}_{12} \\ \boldsymbol{S}_{21} & \boldsymbol{S}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{P} \\ \Delta \boldsymbol{Q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据雅可比矩阵的物理意义可知:S 为考虑负荷静态电压特性的电压--功率灵敏度矩阵。其中,电压与有功功率的灵敏度关系为:

$$\Delta \boldsymbol{U} = \boldsymbol{S}_{21} \Delta \boldsymbol{P} \tag{10}$$

其中,*S*₂₁为电压-有功灵敏度因子,其大小在一定程度上反映了各节点拓扑结构上联系的紧密程度。下文将基于这个灵敏度因子来分析电压控制策略。

2.2 有功-电压控制的建模

当系统中某些节点电压出现越限时,需要采取 控制措施消除电压异常。微电网的线路阻抗比较大 的特性使节点电压受有功功率的影响显著,故除了 可以通过调节无功功率对电压进行控制外,还可以 通过调节有功功率实现微电网的电压控制。

设微电网中含 N 个节点,有功-电压控制目标 为通过一定的有功调节措施将各节点电压控制在 允许范围内,具体如下:

 $U_{i,\min} \leq U_{i0} + \Delta U_i \leq U_{i,\max}$ $i=1,2,\dots,N$ (11) 其中, U_{i0} 为采取有功-电压控制措施前节点 *i* 的电 压; ΔU_i 为采取措施后的电压调整量; $U_{i,\max}, U_{i,\min}$ 分 别为节点 *i* 电压允许范围的上、下限。

通过灵敏度分析建立的节点 i 的电压变化量 ΔU_i 与节点 j 注入系统的有功功率变化量 ΔP_i 的关 系为:

 $\Delta U_i = s_{ij} \Delta P_j$ *i*=1,2,…,*N*-1;*j*=1,2,…,*N*-1 (12) 其中,*s_{ij}*为节点*i*电压 U_i 对节点*j*注入有功功率 P_j 的灵敏度因子,是节点电压-有功灵敏度矩阵 S_{21} 中 的元素。

有功-电压控制需要考虑各电源的最大、最小出 力约束,具体如下:

$$P_{j,\min} \leqslant P_{j0} + \Delta P_j \leqslant P_{j,\max} \tag{13}$$

其中, P_{j0} 为采取控制措施前节点j处电源的有功出力; $P_{j,max}$ 、 $P_{j,min}$ 分别为电源出力的上、下限。

3 基于模糊控制理论的有功-电压控制策略

微电网的二次有功-电压控制是通过调节各电 源的有功出力将各节点电压控制在允许范围内,可 参与实时调节的元件包括:可控电源、储能设备、半 可控电源(如光伏、风电可降出力运行)以及可中断 负荷。

微电网的二次有功-电压控制是一个复杂的多 输入、多输出控制问题。针对这类问题,模糊控制具 有简单可靠、控制速度快的特点,为此本文提出了一 种基于模糊控制理论的微电网电压控制策略,即将 各电源当前状态下的调节性能作为模糊输入,建立 模糊推理机制,从而得到有效的电压控制策略。

3.1 电源调节性能的模糊化建模

3.1.1 电源的电压调节能力模糊化建模

为了描述各电源在当前状态下对节点电压调节 作用的大小,本文提出了电压调节能力的概念。电 压调节能力是指通过调节节点 *j* 处的电源出力,能够 对节点 *i* 电压幅值产生的最大调整量,表示为 *C*_{*ij*}, 其大小与电源当前状态下的有功调节裕度和节点 *i* 电压对节点 *j* 有功功率的灵敏度因子 *s*_{*ij*} 2 个指标有 关,并定义为:

$$C_{ij} = \begin{cases} C_{ij}^{\mathrm{P}} & \Delta U_i < 0\\ C_{ij}^{\mathrm{N}} & \Delta U_i \ge 0 \end{cases}$$
(14)

其中,*C^p_{ij}*、*C^N_{ij}*分别代表节点*j*处的电源对节点*i*电压 的向上、向下调节能力。当节点*i*电压偏差为负时, 需要向上调节节点*i*电压,因此,取向上调节能力指标 标*C^p_{ij}*作为节点*j*电源当前的调节能力指标,反之亦 然。*C^p_{ij}*、*C^N_{ij}*具体的计算公式如下:

$$C_{ij}^{\mathrm{P}} = \begin{cases} s_{ij} \Delta P_{\mathrm{M}j}^{\mathrm{P}} & s_{ij} \ge 0\\ -s_{ij} \Delta P_{\mathrm{M}j}^{\mathrm{N}} & s_{ij} < 0 \end{cases}$$
(15)

$$C_{ij}^{\mathrm{N}} = \begin{cases} s_{ij} \Delta P_{\mathrm{M}j}^{\mathrm{N}} & s_{ij} \ge 0\\ -s_{ij} \Delta P_{\mathrm{M}j}^{\mathrm{P}} & s_{ij} < 0 \end{cases}$$
(16)

其中, $\Delta P_{M_j}^{P}$ 、 $\Delta P_{M_j}^{N}$ 分别为节点 j处电源的向上、向下调节裕度。其具体的计算公式如下:

$$\Delta P_{\rm Mj}^{\rm P} = P_{j,\rm max} - P_{j0} \tag{17}$$

$$\Delta P_{\rm Mi}^{\rm N} = P_{i0} - P_{i,\rm min} \tag{18}$$

式(15)中,当灵敏度因子 s_{ij} 为正时,向上调节能 力指标 C_{ij}^{P} 的取值为节点 i 电压对节点 j 有功的灵敏 度因子与节点 j 处电源有功向上调节裕度的乘积, 即 $s_{ij}\Delta P_{Mi}^{P}$,否则取值为 $-s_{ij}\Delta P_{Mi}^{N}$ 。式(16)中,采用同 样的方式定义向下调节能力指标 C_{ii}。

*C_{ij}*的值越大,表示节点*j*的电源对节点*i*电压的 调节能力越大。对其进行模糊化建模,定义调节能 力的隶属度函数为μ_{cij},如图1所示。



Fig.1 Membership function of DG regulation ability

由图 1 可知:电源调节能力 C_{ij} 的取值越大,其 隶属度函数值越大,当 C_{ij} 的取值大于设定限值 C_{ij,max} 后,其隶属度函数值取 1。在本文提出的控制策略 中,电源调节能力的隶属度函数值越大,其调度的优 先级越高,即优先调度调节能力较大的电源。

3.1.2 电源的电压调节效益模糊化建模

在电压调节过程中,各电源具有不同的调节成本。从微电网供电可靠性、经济性等角度考虑,应尽量避免切负荷操作和尽量避免弃风、弃光,应充分利用调节成本较低的发电单元。因此,为了描述各电源对节点电压调节的经济性,本文提出了电压调节效益指标的概念。电压调节效益是指通过调节节点 *j*处的电源出力对节点*i*电压幅值调节的最优经济效益,表示为*A_{ij}*,其大小与节点*i*电压对节点*j*有功灵敏度因子*s_{ij}*和节点*j*处电源的调节成本*O_j*2个指标有关,并定义为:

$$A_{ij} = \begin{cases} A_{ij}^{P} & \Delta U_i < 0\\ A_{ij}^{N} & \Delta U_i \ge 0 \end{cases}$$
(19)

其中, A_{ij}^{P} , A_{ij}^{N} 分别为节点 j 处的电源对节点 i 电压的 向上、向下调节效益。当节点 i 电压偏差为负时,需 要向上调节节点 i 电压,因此,取向上调节效益指标 A_{ij}^{P} 作为节点 j 电源当前的调节效益指标,反之亦然。 A_{ij}^{P} , A_{ij}^{N} 具体的计算公式如下:

$$A_{ij}^{P} = \begin{cases} s_{ij}/Q_{j}^{P} & s_{ij} \ge 0\\ -s_{ij}/Q_{i}^{N} & s_{ij} < 0 \end{cases}$$
(20)

$$A_{ij}^{N} = \begin{cases} s_{ij}/Q_{j}^{N} & s_{ij} \ge 0\\ -s_{ij}/Q_{j}^{P} & s_{ij} < 0 \end{cases}$$
(21)

其中,Q^p,Qⁿ,分别为控制措施的向上、向下调节成本。 调节成本越大,电源的调节效益越小。对于向上调 节成本,当风电、光伏等半可控电源采用最大功率点 追踪控制时不具有向上调节能力,因此,其向上调节 成本 Q^p取无穷大;对于向下调节成本,当风电、光伏 等半可控电源降出力运行时,将增加其他可控制电 源出力或微电网的购电功率,使得其向下调节成本 较大,因此,为了充分利用风电、光伏发电,减少弃 风、弃光,为其设置较大的向下调节成本,从而使其 具有较小的向下调节效益。

式(20)中,当灵敏度因子 s_{ij} 为正时,向上调节 效益指标 A_{ij}^{P} 的取值为节点 i 电压对节点 j 有功灵敏 度因子与节点 j 处电源向上调节成本之比,即 s_{ij}/Q_{j}^{P} , 否则取值为 $-s_{ij}/Q_{j\circ}^{N}$,式(21)中,采用同样的方式定 义向下调节效益指标 $A_{ij\circ}^{N}$

A_{ij}的值越大,表示节点j处电源对节点i电压 调节的效益越好。对其进行模糊化建模,定义调节 效益的隶属度函数为μ_{Aij},如图2所示。



regulation efficiency

由图 2 可知:电源调节效益 A_{ij} 的取值越大,其隶 属度函数值越大,当 A_{ij} 的取值超过设定限值 A_{ijmax} 后, 其隶属度函数值取 1。在本文提出的控制策略中, 电源调节效益的隶属度函数值越大,则其调度的优 先级越高,即优先调度调节效益较好的电源。

3.2 电压模糊控制策略

在对各电源调节性能的模糊化建模的基础上, 本文提出了相应的模糊控制策略,用于选择合适的 实时控制措施,改善微电网各节点的电压质量。采 用最大-最小模糊推理原则,其推理过程如下。

a. 计算微电网各节点的电压偏差,选择偏差最 大的节点 *i** 作为首要的电压恢复控制节点。

b. 针对节点 *i**,先应用最小原则,计算各电源的 综合控制指标 *h_{iri}* 为:

 $h_{i*j} = \min(\mu_{Cij}, \mu_{Aij}) \quad i \le N - 1; j \le N - 1$ (22)

即取电源的调节能力指标隶属度μ_{cij}与调节效 益指标隶属度μ_{Aij}中的较小者作为电源的综合控制 指标 h_{irio}

c. 针对节点 *i*^{*}, 再采用最大原则, 从 *N*-1 个节 点的电源中获得最有效的控制措施所在节点 *i*^{*} 为:

 $h_{i^*i^*} = \max(h_{i^*1}, h_{i^*2}, \cdots, h_{i^*N-1})$ (23)

上式的含义是:电源 j* 在 N-1 个电源中对节点 i* 进行电压调节的综合控制指标最大。因此,优先采 用节点 j* 处的电源对节点 i* 的电压进行恢复控制。

3.3 电压模糊控制策略的步骤

根据上述模糊推理过程,建立微电网节点电压 的模糊控制策略如图3所示。

微电网节点有功-电压模糊控制的步骤如下:

a. 输入网络拓扑参数、导线参数、节点负荷大小 及其静态电压特性参数、发电机出力及其运行约束





(结束)

以及节点电压的控制目标;

b. 计算基础潮流,并结合式(6)—(10)获得各节 点电压对节点注入功率的灵敏度因子;

c. 电源的调节性能与其当前出力状态有关,因此在各电源的当前出力状态下,根据图 1、图 2 计算各电源的调节能力隶属度函数值 μ_{Cij} 与调节效益隶属度函数值 μ_{Aij} ,其中 $i=1,2,\cdots,N-1$ 且 $j=1,2,\cdots,N-1$;

d. 选择电压偏差最大的节点 *i**,应用最大--最小模 糊推理模型,确定对节点 *i** 进行电压调节的电源 *j**;

e. 根据电压偏差与电压-有功灵敏度因子的大小,计算电源 j* 的有功功率调整量,由于大电网作为 微电网的平衡节点,电源 j* 的功率调整量将由大电 网平衡,并更新其出力状态:

f. 重复步骤 **b**—**e**,直到所有节点电压均满足电压水平要求。

4 算例分析

本文选用如图 4 所示的微电网拓扑结构^[19],进 行微电网并网运行时的有功-电压控制方法研究。微 电网中的电源包括:光伏电池(PV)、风电机组(WT)、 柴油机(DE)、微燃机(MT)、燃料电池(FC)以及储能 系统(ESS)。由于其是并网型微电网,各可控微源及 储能均采用 PQ 控制策略,由中央管理器下发其输 出功率的控制指令。

微电网结构中的电源参数见表 1,线路参数见表 2,本文主要分析的是微电网中有功功率调节对 节点电压的控制效果。

4.1 微电网节点电压--功率灵敏度因子分析

某日 10:00, 微电网的负荷为 225 kW, 各电源出



图 4 微电网算例结构图

Fig.4 Structure of microgrid for case study

表1 微电网中的电源参数

Table 1 Parameters of DGs in microgrid

电源类型	节点	最小出力/kW	最大出力/kW	实际出力/kW
微燃机	4	16	80	0
光伏电池	5	0	100	70
储能系统	6	-100	100	-10
燃料电池	7	7	70	42
柴油机	8	12	60	20
风电机组	10	0	100	52

表 2 微电网中的线路参数

Table 2 Parameters of lines in microgrid

线路	首端节点	末端节点	电阻/ Ω	电抗/ Ω	
1	1	2	0.064	0.022	
2	1	7	0.192	0.067	
3	1	11	0.038	0.016	
4	1	15	0.003	0.013	
5	2	3	0.096	0.033	
6	3	4	0.177	0.048	
7	3	5	0.192	0.067	
8	3	6	0.089	0.024	
9	7	8	0.133	0.036	
10	7	9	0.048	0.017	
11	9	10	0.064	0.022	
12	11	12	0.127	0.054	
13	12	13	0.101	0.043	
14	12	14	0.253	0.108	

力情况如表1中的实际出力列所示,在该运行点处, 第一条馈线各节点的电压--功率灵敏度因子(标幺 值,后同)如表3所示。

从表 3 可以看出:节点电压对有功功率的灵敏 度因子均大于其对无功功率的灵敏度因子。如节点 4 电压对节点 3 有功功率的灵敏度因子是其对无功 功率灵敏度因子的 2.3 倍。可见,在微电网中,线路 电阻大于电抗的情况下,节点电压受有功功率的影响 更大。

不同馈线上节点间的灵敏度因子如表 4 所示, 节点 2、7、11 分别位于不同的馈线上。从表 4 可以 看出:节点电压对其他馈线上的节点功率的灵敏度 因子较小。可见,拓扑结构上联系较弱的节点间的

表 3 第一条馈线各节点的电压--功率灵敏度因子 Table 3 Voltage-power sensitivity factors between buses of Feeder 1

市家	电压功率灵敏度因子					
功平	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	
P_2	0.045	0.047	0.051	0.044	0.049	
Q_2	0.024	0.025	0.027	0.024	0.026	
P_3	0.047	0.116	0.124	0.108	0.119	
Q_3	0.026	0.051	0.054	0.047	0.052	
P_4	0.051	0.124	0.263	0.116	0.127	
Q_4	0.027	0.054	0.094	0.051	0.056	
P_5	0.043	0.105	0.113	0.211	0.108	
Q_5	0.028	0.056	0.060	0.096	0.058	
P_6	0.049	0.120	0.128	0.112	0.184	
Q_6	0.025	0.049	0.052	0.045	0.065	

表 4 不同馈线节点间的电压--有功灵敏度因子 Table 4 Voltage-power sensitivity factors between

huses of different feeders

	buses of unit	cient iccueis	,			
市家	电压	电压功率灵敏度因子				
初平	U_2	U_7	U_{11}			
P_2	0.045	0.002	0.002			
P_7	0.002	0.121	0.002			
P_{11}	0.002	0.002	0.027			

电压与功率的耦合关系也较小。因此,各节点电压 主要受其所在馈线各节点功率变化的影响。

4.2 实时电压控制结果分析

本文取节点电压的允许偏差为±7%。对于并网 型微电网,大电网为微电网提供电压、频率支撑。传 统控制方法中,新能源电源与负荷的实时功率波动 主要由大电网承担。考虑到微电网中节点电压对有 功功率的灵敏度因子较大的特征,本文所提的控制 策略通过实时调整分布式电源、储能设备的有功出 力,来进一步改善微电网的电能质量。从该日 10:00 开始,以 3 min 为步长,模拟一段时间内微电网中新 能源电源出力与负荷的波动情况,若采用无功调节 等手段后仍出现了节点电压越限的情况,则通过有 功-电压模糊控制策略对节点电压进行实时控制,并 得到控制后各节点的稳态电压情况,如图 5 所示。



moments after active-power control

由图 5 可知:在微电网出现功率扰动之后,通过 有功控制能保证节点电压偏差均在 ±7% 范围内。针 对本文算例,在 i5-3470 CPU 3.20 GHz 的 PC 机上, 当采用实时模糊控制方法时,完成一次控制推理计 算过程平均耗时为0.129s,可以满足微电网控制的实 时性要求。

在每次调度过程中,对灵敏度因子等数值进行动态更新,不同时刻的参数的整体趋势接近。如10:03时刻,节点4电压 U₄相对节点3、4有功功率P₃、P₄的灵敏度分别为0.124、0.254,与表3中对应结果相比,数据仅有小范围的变化,在此不再赘述。

为了进一步说明有功控制的效果,图6对比了 3个时刻采取有功控制措施前后的各节点电压情况,图中的虚线和实线分别代表了采取有功控制前 和有功控制后的各节点电压情况,后同。



图 6 实时有功模糊控制前后各节点的电压幅值 Fig.6 Voltage amplitude of buses, before and after active-power control

从图 6 可以看出,在 10:03、10:06、10:12 时刻, 采取有功控制措施前均存在不同程度的节点电压越 上限的情况。

通过有功控制可以有效地将各节点电压控制在 允许范围内。如在10:03时刻,对于出现光伏、风电 出力变大的情况,当仅由大电网平衡这部分功率波 动时,光伏电池节点5与风电机组节点10等节点上 出现了电压偏差超过7%的情况。在这一时刻,节点 4、5、6的电源有功出力对节点5电压的综合控制指 标(标幺值,后同)分别为0、0.40、0.96,因此,优先调 节节点6上储能系统的有功功率对节点5电压进行 控制;节点7、8、10的电源有功出力对节点10电压 的综合控制指标分别为 0.41、0.09、0.35,因此,优先 调节节点 7 上燃料电池的有功功率对节点 10 电压 进行控制。具体地,采用模糊控制策略下的实时有 功控制措施为:将节点6上储能系统的充电功率增 加 11.9 kW,节点 7 燃料电池出力减少 15.5 kW,相 应地,作为平衡节点的大电网(节点 15)注入功率增 加 27.4 kW。这将增加一定的购电费用,但该有功调 节过程可以使节点 5、10 等处的电压恢复到允许范 围内。10:03—10:15 间各时刻电压偏差情况与实时 调度措施见表 5。

由表 5 可知:当节点 5 电压越上限时,主要通过 减少与其处于同一馈线上节点 6 处的储能出力(或

表 5 各时刻节点电压控制结果与实时控制措施 Table 5 Bus voltage control results and real-time control measures for different moments

	0.01111.					
	电压情况			实时控制措施		
时刻	节点	控制前 偏差/%	控制后 偏差/%	节点	调节	调整量/
					设备	kW
	5	8.20	6.85	6	ESS	-11.9
10:03				7	FC	-15.5
	10	8.71	6.79	15		27.4
10:06	10	7 44	6.85	7	FC	-4.8
		7.44		15	_	4.8
10:09	5	7 19	6.89	6	ESS	-5.4
	5	7.40		15	_	5.4
10:12	5	7.12	6.90	6	ESS	-1.8
				7	FC	-10.4
	10	8.14	6.85	15		12.2
10:15	10 7.03	7.02	(00	7	FC	-1.0
		0.90	15	_	1.0	

增加充电功率)对节点5电压进行恢复控制,避免了 弃光情况的发生,有利于提高光伏发电的利用率;而 当节点10电压越上限时,采用的实时调度措施为减 小其同馈线节点7处的燃料电池出力使节点10电 压恢复到允许范围内,避免了弃风情况。在各时段 上,通过模糊控制策略对各电源、储能有功出力进行 实时控制后,可有效减小微电网中各节点的电压偏 差,将电压控制在允许范围内。

为了进一步分析系统电压越下限时的有功-电 压控制效果,图7对比了3个时刻有功控制前后各 节点电压情况。从图7可以看出,在12:03、12:06、 12:09时刻,采取有功控制措施前均存在不同程度的 节点电压越下限的情况。通过有功控制可以将各节 点电压控制在允许范围内。如在12:06时刻,柴油机 节点4与储能节点6等节点上出现了电压偏差超 过-7%的情况。在这一时刻上,采用模糊控制策略 下的实时有功控制措施为:将节点6上储能系统的 输出的有功功率增加17.4 kW,相应地,作为平衡节 点的大电网(节点15)注入功率减少17.4 kW。





需要说明的是,与并联电容器等无功调压技术 相比,实时调节可控微源的有功出力来调压虽然会 增加一定的运行成本,但具有以下优势:可以实现快 速、连续调节;不受类似投切电容的调节次数限制, 具有较大的灵活性;通过设计合理的调节策略,可以 不影响风、光资源的利用。综上所述,本文所提方法 是无功电压调节的重要补充,在无功调节资源不足的 时候可以成为微电网中电压控制的重要方法之一。

5 结论

微电网中输电线路阻抗比一般较大,使得各节 点电压受有功功率的影响显著。本文在微电网电 压-有功灵敏度建模的基础上,分析了通过调节有功 功率对节点电压进行实时控制的适应性,提出了一 种微电网实时电压模糊控制策略,丰富了微电网中 电压控制的方法。

算例结果表明:当光伏、风电出力变化引起节点 电压出现较大偏差时,可以通过调节储能设备或可 控制电源有功出力,有效地将各节点电压控制在允 许范围内,并且不影响风、光资源的利用。

后续工作将进一步研究有功/无功联合电压控制策略,以更好地提高微电网供电的电能质量,并将进一步考虑微电网中负荷动态特性等因素的影响。

参考文献:

- [1] 韩华,刘尧,孙尧,等. 一种微电网无功均分的改进控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2639-2648.
 HAN Hua,LIU Yao,SUN Yao,et al. An improved control strategy for reactive power sharing in microgrids[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2639-2648.
- [2] 杨向真,苏建徽,丁明,等. 面向多逆变器的微电网电压控制策略
 [J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):7-13.
 YANG Xiangzhen,SU Jianhui,DING Ming, et al. Voltage control strategies for microgrid with multiple inverters [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(7):7-13.
- [3] 陈达威,朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报,2010,25(7):117-122.
 CHEN Dawei,ZHU Guiping. Power transmission characteristics of low voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(7):117-122.
- [4] WANG Z, WANG J, CHEN B, et al. MPC-based voltage/var optimization for distribution circuits with distributed generators and exponential load models [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 5(5): 2412-2420.
- [5] 苏晨,吴在军,吕振宇,等. 基于边际成本下垂控制的自治微电网 分布式经济运行控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):59-66. SU Chen,WU Zaijun,LÜ Zhenyu,et al. Droop control based on marginal cost for distributed economic operation of islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11): 59-66.
- [6] 鲁斌,刘雪艳. 基于 MAS 和 CA 的多微电网孤岛模式下无功电 压的控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):6-14. LU Bin,LIU Xueyan. Reactive power and voltage control based on MAS and CA for islanded multi-microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):6-14.
- [7] MAKNOUNINEJAD A, QU Z. Realizing unified microgrid voltage profile and loss minimization: a cooperative distributed optimization

and control approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014, 5(4):1621-1630.

- [8] 鲍薇,胡学浩,李光辉,等. 基于同步电压源的微电网分层控制策 略设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(23):20-26.
 BAO Wei,HU Xuehao,LI Guanghui, et al. Synchronous voltage source based design of hierarchical control strategy for microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(23):20-26.
- [9] SHI H,ZHUO F,YI H,et al. A novel real-time voltage and frequency compensation strategy for photovoltaic-based microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (6): 3545-3556.
- [10] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2):797-807.
- [11] ROBBINS B A, HADJICOSTIS C N, DOMINGUEZ-GARCIA A D. A two-stage distributed architecture for voltage control in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2):1470-1482.
- [12] 彭春华,王立娜,李云丰. 低压微电网三相逆变器功率耦合下垂 控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):28-33.
 PENG Chunhua,WANG Lina,LI Yunfeng. Strategy of powercoupling droop control for three-phase inverter in low-voltage microgird[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3): 28-33.
- [13] 张宸宇,梅军,郑建勇,等.一种适用于低压微电网的改进型下 垂控制器[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):53-59.
 ZHANG Chenyu, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Improved droop controller for low-voltage microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4):53-59.
- [14] HAN H,LIU Y,SUN Y,et al. An improved droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6);3133-3141.
- [15] OLIVARES D E, MEHRIZI-SANI A, ETEMADI A H, et al.

Trends in microgrid control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4); 1905-1919.

- [16] TAN K T, PENG X Y, SO P L, et al. Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4):1977-1987.
- [17] KORUNOVIC L M,STOJANOVIC D P,MILANOVIC J V. Identification of static load characteristics based on measurements in medium-voltage distribution network [J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2008,2(2);227-234.
- [18] 李欣然,贺仁睦,章健,等.负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J].中国电机工程学报,1999,19(4):26-30.
 LI Xinran,HE Renmu,ZHANG Jian, et al. Effect of load characteristics on power system stead-state voltage stability and the practical criterion of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(4):26-30.
- [19] JIANG Q, XUE M, GENG G. Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):3380-3389.

作者简介:



张 忠(1988—),男,辽宁营口人,博士 研究生,主要研究方向为微电网经济调度与 运行控制(**E-mail**:zz3111161015@stu.xjtu. edu.cn);

王建学(1976—),男,重庆人,教授,博士, 通信作者,主要研究方向为电力系统规划和 运行、微电网规划和运行、电力市场与电力 经济等(**E-mail**;jxwang@mail.xjtu.edu.cn);

经所守(E-man:jxwang@mail.xjtu.edu.cn);

刘世民(1973—),男,河北枣强人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统及其自动化、微电网控制系统(E-mail: shiminliua@163.com)。

Adaptability of active-power adjustment to voltage control considering network topology of microgrid

ZHANG Zhong¹, WANG Jianxue¹, LIU Shimin²

(1. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China; 2. BBHT-Beijing Beibian Microgrid Technology Company, Beijing 100093, China)

Abstract: Since the electrical connection of microgrid is closer and its LV(Low Voltage) line resistance is larger, its voltage level is closely related to both active-power and reactive-power. A relationship model between bus-voltage and active-power is built and the sensitivity matrix of bus-voltage to active-power is derived. Aiming at the limited regulation capacity of DG(Distributed Generation) converters in the primary voltage control of microgrid, a fuzzy control strategy is proposed for the secondary voltage control of microgrid. A sensitivity model of active-power to bus-voltage is built, which considers the influence of network topology. A real-time voltage control model based on fuzzy control theory is built, which adjusts the active-power of microgrid to enrich the means of microgrid voltage control. Case study shows that, if the resistance-reactance ratio of microgrid line is larger, the influence of active-power on the bus-voltage is larger too. In addition to the reactive-power control, the DG active-power adjustment can be used to effectively control the bus voltage within allowed range for enhancing the voltage quality of microgrid. **Key words**: microgrid; voltage control; network topology; sensitivity analysis; fuzzy control