

基于可控负荷与蓄电池储能的直流配电网电压波动抑制

朱晓荣, 陈朝迁

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:为了抑制直流配电网电压波动,提出了一种基于可控负荷与蓄电池储能的综合控制策略。对影响直流配电网电压波动的因素,包括新能源输出功率变化、负荷变动、线路参数变化及新能源接入位置进行了具体分析。当电压波动较小时,利用可控负荷即可抑制直流电压波动,可以减少蓄电池的容量配置及其充放电次数,提高了储能装置的经济性;当电压波动较大时,由于可控负荷的容量有限,需要蓄电池对直流电压波动进行抑制,因此可控负荷需与蓄电池配合控制,并对两者控制参数进行了设计,采用基于扰动观测器的前馈控制,减小了直流电压暂态波动。在MATLAB/Simulink中建立了直流配电网模型并进行了时域仿真,仿真结果表明所提控制策略能够抑制上述因素造成的直流电压波动,提高直流配电网各节点的电能质量。

关键词:直流配电网;电能质量;电压波动;可控负荷;蓄电池储能;参数设计;扰动观测器

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006011

0 引言

面对日益严峻的能源危机,分布式能源的开发与利用是中国乃至全球能源开发利用的大势所趋,越来越多的装置和负荷均产生或消耗直流电^[1-2]。与交流输电相比,直流输电具有能量损耗少、无频率问题、无涡流和无功损耗等优点,因此直流电网受到广泛关注^[3-4]。

由于直流电网中没有无功功率的波动,直流母线电压是衡量直流电网功率平衡以及电能质量的唯一指标^[5]。直流配电网电压的波动性给供电的电能质量带来了威胁,对关键负荷的供电可靠性产生不利影响。文献[6]对直流电压稳定标准进行了介绍,即在系统受干扰时,直流母线电压波动不超过其额定值的 $\pm 5\%$ 。文献[7]指出直流电压波动主要由分布式电源功率变化引起,分布式电源一般采用最大功率点跟踪技术,由于分布式能源的间歇性和随机性,分布式电源的输出功率不稳,进而影响直流电压的稳定。同时,传统负荷的波动性及电动汽车接入电网充电时的不确定性使电网的运行更容易接近其运行极限,影响电网电压的稳定^[8]。另外,分布式电源接入位置存在不确定性,当线路进行切换或发生故障时,线路参数也会发生变化,同样会使直流电压产生波动。

对于直流电压波动,文献[9]将储能配置在敏感负荷处,设计了一种电流内环的前馈控制策略,抑制了由负荷变动造成的直流电压波动;文献[10]对于高光伏PV(PhotoVoltaic)渗透电网,提出局部下垂和分布式控制的协调控制来调节电池储能的充放电,以抑制电压波动;文献[11]提出了基于开关序列的蓄电池储能BESS(Battery Energy Storage Systems)

双向DC/DC变换器预测电流控制策略,实现了光伏功率波动的有效抑制;文献[12]对蓄电池储能不同运行方式下的功率波动平抑效果与平抑成本进行了比较分析,但只是从运行方式上降低了储能设备的成本,并没有降低储能装置的容量投资,而且仅抑制了分布式电源功率变化引起的电压波动。文献[13]提出了适用于交流系统的电气弹簧概念,将可控负荷通过电力电子变换器接入电网,通过调节可控负荷来控制节点电压;文献[14]研究了电气弹簧在交流微电网中的应用,可以进一步改善稳态频率偏差,但这些成果仅适用于交流系统。文献[7,15]借鉴交流电网对电气弹簧的研究经验,利用可控负荷,提出适用于直流电网的直流电气弹簧概念,对直流电网的电压波动进行抑制。由于可控负荷容量有限,对电压波动的控制存在一个最大值边界,当其容量位于边界之外时,无法将电压控制到额定值,此时对直流电压的控制能力有限。

本文对新能源输出功率变化、负荷变动等引起直流电压波动的因素进行了具体分析,提出了一种基于可控负荷与蓄电池储能的综合控制策略来抑制直流电压波动。采用基于扰动观测器的前馈控制,蓄电池储能弥补可控负荷容量的不足,利用可控负荷减小储能设备的容量,减少其充放电次数,提高使用寿命,并对参数进行设计,提高直流配电网各节点电能质量。

1 直流电压波动分析

1.1 直流电压波动系数

直流电网中源荷功率的快速连续变化和线路参数变化将造成直流电压的波动^[16],文献[17]根据直流电压波动的时间尺度、产生机理及波动周期将直流电网电压波动分为扰动型和振荡型2种。为了评

估分布式微源功率变化等因素对直流电压稳定产生的影响,定义直流电压波动系数 δ 为:

$$\delta = \frac{U_{dc} - U_{dcN}}{U_{dcN}} \times 100\% \quad (1)$$

其中, U_{dc} 、 U_{dcN} 分别为直流电压测量值和额定值。

1.2 直流电压波动机理分析

本文选取的直流配电网的线路图如图 1(a)所示,包括光伏、永磁同步发电机组 PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator)、负荷等。图中, R_s 、 r_1 、 r_2 、 r_3 、 $\dots$ 为线路电阻。光伏、风机分别通过 DC/DC 变换器、AC/DC 变换器接入直流母线,换流器均采用最大功率点跟踪控制。交流电网通过双向 AC/DC 变换器接入直流配电网,换流器采用定直流电压控制,直流输出电压 $U_G=400$ V。当节点数为 3 时,直流配电网的等效电路模型如图 1(b)所示。图中, U_0 — U_2 分别为节点 0—2 的电压; R_{L1} 、 R_{L2} 为直流负荷等效电阻; i_{PV} 、 i_W 分别为光伏、风机输出电流。光伏功率 $P_{PV}=U_1 i_{PV}$,风机功率 $P_W=U_2 i_W$ 。额定电压 $U_{dcN}=400$ V,依据式(1)计算 δ ,分析直流电压波动。这里给出了不同因素对节点 2 电压的影响分析,其余节点电压的影响分析与节点 2 一致,不再赘述。

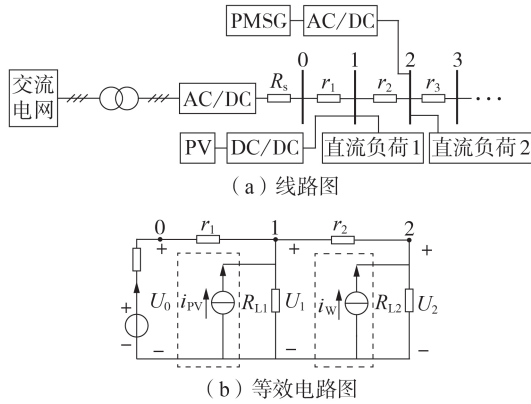


图 1 直流配电网结构图

Fig.1 Configuration of DC distribution network

由电路叠加原理可得节点 2 电压为:

$$U_2 = \frac{R_{L1} R_{L2}}{R_{eq1}} U_G + \frac{R_{L1} R_{L2} (R_s + r_1)}{R_{eq1}} i_{PV} + R_{eq2} i_W \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_{eq1} = (R_s + r_1)(R_{L1} + R_{L2} + r_2) + R_{L1}(R_{L2} + r_2) \\ R_{eq2} = [R_{L1} R_{L2} (R_s + r_1) + R_{L2} r_2] / [(R_{L2} + r_2) \times (R_{L1} + R_s + r_1) + R_{L1}(R_s + r_1)] \end{cases}$$

(1) 负荷与线路参数变化。考虑极端情况,夜间光伏不发电且无风,即 $i_{PV}=i_W=0$ 时,令 $R_s=0.28 \Omega$, $R_{L1}=10 \Omega$, $r_1=0.28 \Omega$, r_2 在 $0.1 \sim 1 \Omega$ 范围内变化, R_{L2} 在 $5 \sim 100 \Omega$ 范围内变化,可得到负荷与线路参数变化对节点 2 电压的影响,如附录中图 A1(a)所示。可以看

出,直流电网中负荷与线路参数变化将导致直流电压剧烈波动,负荷越重,线路电阻越大,则直流电压跌落程度越大甚至越过下限。

(2) 新能源接入位置与功率变化。令 $R_s=0.28 \Omega$, $R_{L1}=R_{L2}=10 \Omega$, $r_1=r_2=0.28 \Omega$, 光伏与风机功率分别从 0 增加到 30 kW,可以得到电压波动系数如附录中图 A1(b)所示。可以看出,新能源接入对节点电压具有抬升作用,可以减小电压波动系数,并且风机功率增大 30 kW 时 δ 减至 1.2%,而光伏功率增大 30 kW 时 δ 减至 -3.2%,风机的抬升作用大于光伏,说明接入位置离节点 2 越近,对于节点 2 电压的抬升作用越大。当新能源功率过大时,直流潮流会出现反转,导致节点 2 电压越过上限。

2 可控负荷与蓄电池综合控制

对于第 1 节所述因素造成的直流电压波动,本文提出了基于可控负荷与蓄电池储能装置的综合控制。只要其中一个节点电压越限,就需要控制,才能满足所有节点的电能质量要求。波动较小时,可控负荷就可完全抑制波动;波动较大时,可控负荷受容量限制无法完全抑制电压波动,再由蓄电池储能装置来消除电压波动。电压越上限时,给定参考值 $U_{iref}=420$ V;电压越下限时,给定参考值 $U_{iref}=380$ V。控制流程图如附录中图 A2 所示。

2.1 蓄电池控制策略

蓄电池的电路拓扑结构如图 2 所示。图中, u_{i1} 、 u_{sc} 分别为直流电网侧电压、蓄电池端电压; i_B 、 i_{sc} 分别为直流电网侧电流、蓄电池电流; L_1 为滤波电感; C_1 为直流母线电容; i_0 为直流母线输出电流。

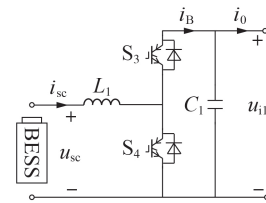


图 2 蓄电池电路拓扑

Fig.2 Circuit topology of BESS

蓄电池控制框图如图 3 所示。图中, K_{PWM1} 为蓄电池脉宽调制(PWM)等效增益; $K_D=u_{sc}/u_{i1}$ 为比例系数; $G_u(s)$ 、 $G_i(s)$ 分别为电压环、电流环 PI 控制传递函数; i_{sc}^* 为蓄电池电流参考值。

$$G_u(s) = K_{pu} + \frac{K_{iu}}{s} \quad (3)$$

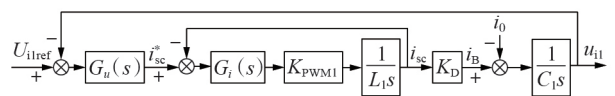


图 3 蓄电池控制框图

Fig.3 Control block diagram of BESS

$$G_i(s) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \quad (4)$$

其中, K_{pu} 、 K_{iu} 分别为电压环的比例系数、积分系数; K_{pi} 、 K_{ii} 分别为电流环的比例系数、积分系数。

双向 DC/DC 变换器的滤波电感通用计算公式^[18]为:

$$L \geq \frac{U_l}{2f I_{0min}} \left(1 - \frac{U_l}{U_h} \right) \quad (5)$$

其中, I_{0min} 为电感最小平均电流; U_h 、 U_l 分别为双向 DC/DC 变换器高压侧电压和低压侧电压; f 为开关频率。根据数学理论配方可得 $U_l = U_h/2$ 时, 滤波电感达到最大值。若图 2 蓄电池 DC/DC 换流器中电感电流最小值取 5 A, 高压侧输出电压取 400 V, 开关频率取 10 kHz, 则滤波电感 L_1 可取为 2 mH。

根据图 3 可得电流环闭环传递函数为:

$$G_{ci}(s) = \frac{K_{pi} K_{PWM1} s + K_{ii} K_{PWM1}}{L_1 s^2 + K_{pi} K_{PWM1} s + K_{ii} K_{PWM1}} \quad (6)$$

根据经典控制理论, 二阶系统阻尼 ζ 与自然频率 ω_n 可表示为:

$$\begin{cases} \zeta = \frac{K_{pi}}{2} \sqrt{\frac{K_{PWM1}}{L_1 K_{ii}}} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{K_{ii} K_{PWM1}}{L_1}} \end{cases} \quad (7)$$

通过这 2 个指标可以确定系统的时域指标, 如调节时间 t_s 、超调量 σ 等。在进行参数设计时还需控制系统有一定的频宽^[19]。带宽频率 ω_b 的表达式为:

$$\omega_b = \omega_n \sqrt{(1-2\zeta^2) + \sqrt{(1-2\zeta^2) + 1}} \quad (8)$$

若系统参数 $K_{PWM1}=1$, 选择阻尼系数 $\zeta=0.707$ 、 $\omega_b=600$ rad/s, 联立式(7)和式(8)可得 $K_{pi}=2.3$ 、 $K_{ii}=360$ 。

同样, 由图 3 可以得到电压闭环传递函数为:

$$\begin{aligned} u_{il}(s) &= G_{Bdref}(s) U_{ilref} - G_{Bdt}(s) i_0 \\ \begin{cases} G_{Bdref}(s) = \frac{G_u(s) G_{ci}(s) K_D}{C_1 s + G_u(s) G_{ci}(s) K_D} \\ G_{Bdt}(s) = \frac{1}{C_1 s + G_u(s) G_{ci}(s) K_D} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

若系统参数 $C_1=5$ mF, 得到电压闭环特征方程, 电压环特征值根轨迹见附录中图 A3。由图 A3(a) 可以看出, 当 $K_{pu}=0.2$ 而 K_{iu} 从 60 变化到 200 时, 距离虚轴较近的 2 个特征根逐渐靠近虚轴, 并越过虚轴, 实部大于 0, 系统不稳定, 则积分系数选择 $K_{iu}=60$; 由图 A3(b) 可以看出, 当 $K_{iu}=60$ 而 K_{pu} 从 0.1 变化到 1 时, 距离虚轴较近的 2 个特征根逐渐远离虚轴, 则比例系数选择 $K_{pu}=1$ 。

为了消除输出电流 i_0 扰动的影响, 加入了基于扰动观测器的电流前馈控制, 如图 4 所示, 可得到如

下传递函数:

$$u_{il}(s) = G_{Bdref}(s) U_{ilref} - \frac{G_f(s) G_{ci}(s) K_D - 1}{C_1 s + G_u(s) G_{ci}(s) K_D} i_0 \quad (10)$$

其中, $G_f(s) = \frac{1}{G_{ci}(s) K_D}$ 。

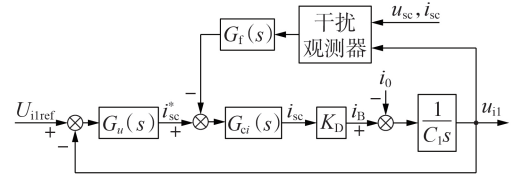


图4 基于前馈控制的蓄电池控制框图

Fig.4 Control block diagram of BESS based on feedforward control

加入前馈控制需增加额外的电流传感器测量 i_0 , 会增加系统成本, 不利于电网的扩展和即插即用, 因此引入干扰观测器对扰动量快速跟踪。

DC/DC 变换器的动态方程可表示为:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{sc}}{dt} = \begin{cases} i_{sc} - D_1 u_{il} & \text{Buck} \\ u_{sc} - (1-D_2) u_{il} & \text{Boost} \end{cases} \\ C_1 \frac{du_{il}}{dt} = \frac{u_{sc} i_{sc}}{u_{il}} - i_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, D_1 、 D_2 分别为开关管 S_3 、 S_4 的占空比。令:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T = [i_{sc} \ u_{il}]^T \\ u = \begin{cases} D_1 & \text{Buck} \\ D_2 & \text{Boost} \end{cases} \\ d(t) = i_0, \ y = u_{il} \end{cases}$$

经过重新定义, 则式(11)可表达为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{f}_1(\mathbf{x})u + \mathbf{f}_2(\mathbf{x})d(t) \\ y = x_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \begin{bmatrix} \frac{u_{sc}}{L_1} & \frac{u_{sc} x_1}{C_1 x_2} \end{bmatrix}^T & \text{Buck} \\ \begin{bmatrix} \frac{u_{sc}}{L_1} - \frac{x_2}{L_1} & \frac{u_{sc} x_1}{C_1 x_2} \end{bmatrix}^T & \text{Boost} \end{cases}$$

$$\mathbf{f}_1(\mathbf{x}) = \begin{cases} \begin{bmatrix} -x_2/L_1 & 0 \end{bmatrix}^T & \text{Buck} \\ \begin{bmatrix} x_2/L_1 & 0 \end{bmatrix}^T & \text{Boost} \end{cases}$$

$$\mathbf{f}_2(\mathbf{x}) = [0 \ -1/C_1]^T$$

应用传统指数的收敛型干扰观测器可设计为:

$$\hat{d}(t) = \mathbf{m} \mathbf{f}_2(\mathbf{x}) \hat{d}(t) - \mathbf{m} (\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{f}_1(\mathbf{x})u) \quad (13)$$

其中, $\hat{d}(t)$ 为观测器跟踪值, 即输出电流 i_0 的观测值; $\mathbf{m} = [m_1 \ m_2]$ 为收敛系数。

式(13)中存在微分运算, 这里定义了辅助变量 a 以消除微分运算, 令:

$$a = \hat{d}(t) + h(x) \quad (14)$$

其中, $h(x) = mx$ 。

将式(13)代入式(14),可得:

$$\begin{aligned} \dot{a} &= \dot{\hat{d}}(t) + m\dot{x} = mf_2(x)(a - h(x)) + \\ &\quad m(f(x) + f_1(x)u) \end{aligned} \quad (15)$$

将式(12)代入式(15),令 $m_1 = 0$,可得到干扰观测器表达式为:

$$\begin{cases} \dot{a} = -\frac{m_2(a - m_2u_{i1})}{C_1} + \frac{m_2u_{sc}i_{sc}}{C_1u_{i1}} \\ a = \hat{d}(t) + h(x) \end{cases} \quad (16)$$

2.2 可控负荷控制策略

假设直流电网存在可控负荷,在一定范围内可调整其功率和端电压,通过控制可控负荷功率来消除直流电压波动。建立可控负荷电路拓扑,如图 5 所示。图中, u_{i2} 、 u_c 分别为直流电网侧电压、可控负荷侧电压; i_2 为 DC/DC 变换器输入电流; i_1 为直流母线电流; u_L 、 i_L 分别为负荷电压、负荷电流; L_2 、 C_2 分别为滤波电感、直流母线电容; R_c 为负荷等效电阻。可控负荷不参与调节时,开关管 S_1 导通, S_2 关断,此时 $u_c = u_{i2}$; 可控负荷参与调节时,通过改变开关管占空比 D 来控制可控负荷。假设可控负荷并未完全投入,电压越下限时,降低端电压;电压越上限时,可控负荷全部投入,参与调节,稳定直流电压。

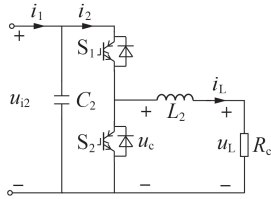


图 5 可控负荷的电路拓扑结构

Fig.5 Circuit topology of controllable load

在忽略损耗的情况下,从电源侧看,可控负荷的等效电阻 R_{ceq} 为:

$$R_{ceq} = \frac{1}{D^2} R_c \quad (17)$$

可控负荷也采用基于干扰观测器的前馈双闭环控制,这里不再赘述。可控负荷是通过控制负荷功率的变化来平衡直流配电网的功率,以抑制直流电压波动,但可控负荷的功率容量限制了对直流电压的控制能力,因此需与蓄电池配合控制。

3 仿真验证

为了验证本文对直流电压波动机理的分析及所提可控负荷与蓄电池综合控制策略的正确性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上建立如附录中图 A4 所示的直流配电网仿真模型,系统参数如附录中表

A1 所示,可控负荷与蓄电池 PI 参数如附录中表 A2 所示。

3.1 各因素对直流电压波动的影响

(1) 负荷和线路参数改变。此时光伏、风机均不发电,开关 B_1 闭合,其余开关断开。负荷变化:2 s 时,开关 B_2 闭合,20 Ω 负荷投入;3 s 时,开关 B_3 闭合,30 Ω 负荷投入。线路参数变化:4 s 时,开关 B_4 闭合,节点 0 与节点 1 之间线路电阻由 0.28 Ω 减小为 0.14 Ω ;5 s 时,开关 B_5 闭合,节点 1 与节点 2 之间线路电阻由 0.28 Ω 减小为 0.14 Ω 。节点电压波动如图 6(a) 所示,节点 2 电压波动与式(2)计算结果一致。

(2) 新能源接入位置和输出功率变化。此时开关 B_1 闭合,其余开关断开。节点 0—2 电压波动如图 6(b) 所示。2 s 时,光伏接入,功率为 15 kW,节点 2 电压由 350.4 V 增至 369.8 V;3 s 时,光伏增发 15 kW,节点 2 电压由 369.8 V 增至 389.1 V,可以看出,新能源接入对节点电压有抬升作用,减小了直流电压波动。4 s 时,风机接入,功率为 15 kW,节点 2 电压由 389.1 V 增至 412.5 V,节点 1 电压由 399.9 V 增至 414 V,大于节点 0 电压,此时交流电网吸收功率;5 s 时,风机增发 15 kW,节点 1 电压由 414 V 增至 428.4 V,节点 2 电压由 412.5 V 增至 435.2 V,节点 0 电压未越限,节点 1、2 电压均越限。可以看出,相同功率条件下,风机对节点 2 电压的抬升作用大于光伏,光伏对节点 1 电压的抬升作用大于风机,说明接入位置离节点越近,对于节点电压的抬升作用越大。并且当新能源功率增大到一定程度时,直流潮流会反转,使节点 2 电压越过上限,甚至会使节点 1 电压越限。

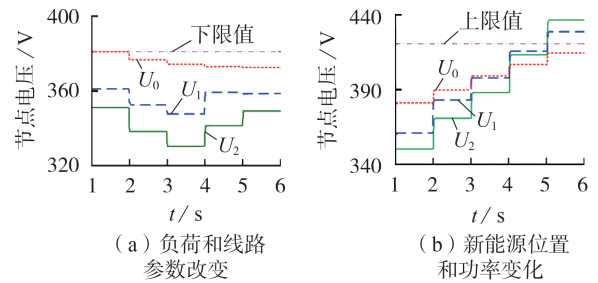


图 6 不同因素对直流电压波动的影响

Fig.6 Influence of various factors on DC voltage fluctuation

3.2 基于干扰观测器的前馈控制

此时光伏、风机均不发电,开关 B_1 闭合,其余开关断开。1.5 s 时,开关 B_2 闭合,20 Ω 负荷投入,节点 2 电压由 350.4 V 降低到 337.7 V,分别加入传统双闭环控制和基于干扰观测器的前馈控制,直流电压波形如图 7(a) 所示。可看出,加入前馈控制后,直流电压的暂态波动减小,调节时间也随之减少。图 7(b) 为直流母线输出电流 i_0 的观测值与实际值对比图,

可以看出观测值能迅速跟踪上实际值并具有良好的跟踪效果。考虑线路动态(电感)过程,线路电感参数对电流前馈控制的影响如附录中图A5所示。当电感值从0增大到8 mH时,直流电压的暂态波动逐渐减小,但是调节时间随之增加,总体而言,考虑线路动态(电感)过程后线路电感参数对电流前馈控制影响并不大。

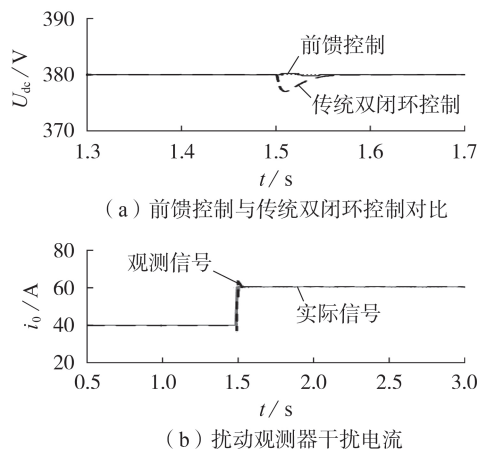


图7 基于扰动观测器的前馈控制的仿真结果

Fig.7 Simulative results of feedforward control based on disturbance observer

3.3 可控负荷与蓄电池综合控制

(1)直流电压越下限,波动较小。此时光伏功率为15 kW,风机不发电,开关均断开。2 s时,开关 B_3 闭合,30 Ω 负荷投入;3 s时,光伏增发5 kW;4 s时,开关 B_1 闭合,20 Ω 负荷投入;5 s时,开关 B_5 闭合,节点1与节点2之间线路电阻由0.28 Ω 减小为0.14 Ω ,此时节点0、1电压未越限,所以图8仅给出节点2电压。若2 s时投入可控负荷对直流电压控制,从图8可以看出直流电压波动较小时,可控负荷能够对其进行有效抑制,使母线电压维持在380 V,不需要蓄电池放电。

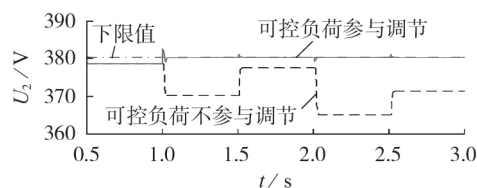


图8 直流电压越下限且波动较小时的仿真结果

Fig.8 Simulative results when DC voltage exceeds lower limit and has less fluctuation

(2)直流电压越下限,波动较大。此时光伏、风机均不发电,开关 B_1 闭合,其余开关断开。2 s时,开关 B_2 闭合,20 Ω 负荷投入;3 s时,光伏增发15 kW;4 s时,开关 B_3 闭合,30 Ω 负荷投入;5 s时,开关 B_4 闭合,节点0与节点1之间线路电阻由0.28 Ω 减小为

0.14 Ω ,节点电压如图9(a)中第1图所示。此时直流电压波动较大,可控负荷受容量限制不能将母线电压控制到380 V,可控负荷对直流电压控制的极限值如图9(a)中第2图所示,仅将节点0电压控制到下限值以上。若2 s时加入蓄电池,节点电压如图9(a)中第3图所示,蓄电池弥补了可控负荷容量的不足,将所有节点电压维持在下限值以上。图9(b)为蓄电池发出的功率,可以看出,不投入可控负荷时蓄电池最大功率为22.6 kW;投入可控负荷时蓄电池最大功率为15.4 kW,与不投入可控负荷时相比,蓄电池功率减小了7.2 kW,与可控负荷容量一致,因此可控负荷可减小蓄电池的配置容量。随着可控负荷容量的增加,蓄电池的容量配置越低,具体如表1所示。

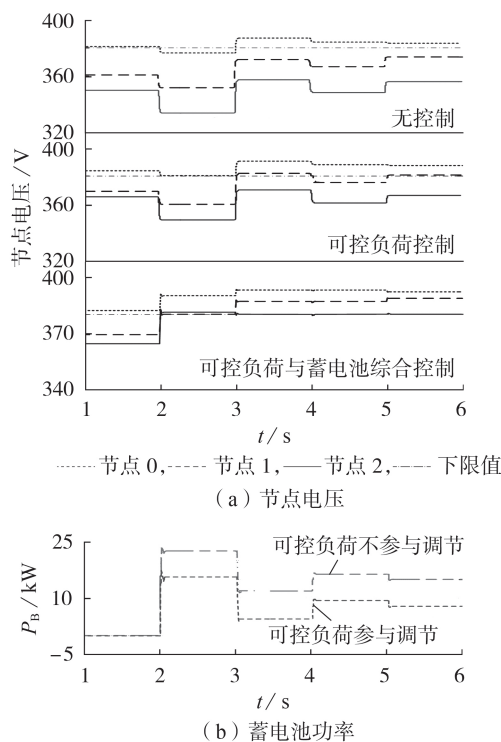


图9 直流电压越下限且波动较大时的仿真结果

Fig.9 Simulative results when DC voltage exceeds lower limit and has large fluctuation

表1 储能容量与可控负荷的关系

Table 1 Relationship between energy storage capacity and controllable load

可控负荷/ Ω	储能容量减小值/kW	可控负荷/ Ω	储能容量减小值/kW
10	14.4	20	7.2
15	9.6	25	5.8

将光伏、风机与负荷功率均设为随机波动时,直流电压波动如附录中图A6所示。采用可控负荷与蓄电池综合控制时,控制动作区分为可控负荷动作区与蓄电池动作区两部分;采用单独蓄电池综合控制时,控制动作区只有蓄电池动作区,即为可控负荷

动作区与蓄电池动作区之和。采用可控负荷与蓄电池综合控制的蓄电池动作次数为14,可控负荷动作次数为21,单独采用蓄电池时的动作次数为35,可以看出采用综合控制时蓄电池动作次数明显少于单独蓄电池控制的动作次数。

4 结论

针对直流电压波动问题,本文提出了一种基于可控负荷与蓄电池储能的综合控制策略。

(1)验证了微源功率、负荷变化等因素对直流电压波动的影响,引入蓄电池储能装置抑制直流电压波动,投入可控负荷可降低蓄电池的容量要求,并能减少其充放电次数,提高了储能装置的经济性,并且蓄电池能够弥补可控负荷容量的不足,实现可控负荷与蓄电池综合控制;

(2)采用了基于扰动观测器的前馈控制,与传统双闭环控制比较,可提高系统响应速度,减小直流电压的暂态波动;

(3)仿真结果表明,所提综合控制策略能有效解决直流电网电压波动问题,使直流配电网各节点均满足其电能质量要求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 付媛,黄馨仪,徐岩,等. 直流配电网中旋转电机的可控惯性控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):32-38.
FU Yuan, HUANG Xinyi, XU Yan, et al. Controllable inertial control strategy of rotating motor in DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 32-38.
- [2] ALEJANDRO G. On convergence of Newton's method in power flow study for DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5770-5777.
- [3] 王守相, 褚程程, 刘琪, 等. 基于VSC的直流配电网限流电抗器位置和参数优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 89-95.
WANG Shouxiang, ZHUO Chengcheng, LIU Qi, et al. Optimal allocation method for location and parameter of current-limiting reactor in VSC-based DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 89-95.
- [4] 王宁, 袁杰, 焦晋荣, 等. 直流配电网多变流器纹波谐振问题研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 77-83.
WANG Ning, YUAN Jie, JIAO Jinrong, et al. Ripple resonance of DC distribution network with multiple converters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 77-83.
- [5] 朱晓荣, 张雨濛, 荆树志. 一种不平衡负载下直流微电网电压脉动抑制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3437-3449.
ZHU Xiaorong, ZHANG Yumeng, JING Shuzhi. A voltage ripple suppression method of DC microgrid under unbalanced load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3437-3449.
- [6] 施婕, 郑漳华, 艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 86-90.
SHI Jie, ZHENG Zhanghua, AI Qian. Modeling of DC microgrid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 86-90.
- [7] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 基于直流电气弹簧的直流配电网电压波动抑制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 23-31.
ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. DC electric spring for voltage fluctuation suppressing of DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 23-31.
- [8] 张谦, 唐飞, 刘涤尘, 等. 计及电动汽车充电和负荷波动极限的电力系统静态电压稳定性评估方案[J]. 电网技术, 2017, 31(17): 23-31.
ZHANG Qian, TANG Fei, LIU Dichen, et al. A static voltage stability assessment scheme of electric power systems considering charging state of plug-in electric vehicles and load fluctuation limits[J]. Power System Technology, 2017, 31(17): 23-31.
- [9] 谢文强, 韩民晓, 曹文远, 等. 储能换流器动态过程分析与前馈控制改进策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 178-184.
XIE Wenqiang, HAN Minxiao, CAO Wenyuan, et al. Dynamic process analysis and improved feedforward strategy for storage converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 178-184.
- [10] ZERAATI M, GOLSHAN M E H, GUERRERO J. Distributed control of battery energy storage systems for voltage regulation in distribution networks with high PV penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3582-3593.
- [11] 杨惠, 晁凯悦, 孙向东, 等. 基于开关序列的光伏储能双向DC-DC变换器预测电流控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 300-307.
YANG Hui, CHAO Kaiyue, SUN Xiangdong, et al. Predictive current control method of photovoltaic energy storage for bi-directional DC-DC converter based on switching sequence[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 300-307.
- [12] 张新松, 袁越, 郑源, 等. 用于风功率波动平抑的储能运行策略对比分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2797-2805.
ZHANG Xinsong, YUAN Yue, ZHENG Yuan, et al. Comparative analysis on operation strategies of energy storage systems for mitigating wind power fluctuations[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2797-2805.
- [13] HUI S, LEE C, WU F. Electric springs—a new smart grid technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1552-1561.
- [14] CHEN X, HOU Y, TAN S C, et al. Mitigating voltage and frequency fluctuation in microgrids using electric springs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 508-515.
- [15] MOK K T, WANG M H, TAN S C, et al. DC electric springs—a technology for stabilizing DC power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1088-1105.
- [16] 廖建权, 周念成, 王强钢, 等. 直流配电网电能质量指标定义及关联性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6847-6860.
LIAO Jianquan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Definition and correlation analysis of power quality index of DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6847-6860.
- [17] 王成山, 李微, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 84-97.
WANG Chengshan, LI Wei, WANG Yifeng, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-97.
- [18] 张敬南, 张军伟. 基于数字控制的双向直流变换装置的设计

[J]. 电力电子技术, 2012, 46(11): 90-92.

ZHANG Jingnan, ZHANG Junwei. Bi-directional DC/DC converter unit based on digital control[J]. Power Electronics, 2012, 46(11): 90-92.

[19] 王成山, 李霞林, 郭力. 基于功率平衡及时滞补偿相结合的双级式变流器协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 109-117.

WANG Chengshan, LI Xialin, GUO Li. Coordinated control of two-stage power converters based on power balancing and time-delay compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 109-117.

作者简介:



朱晓荣

朱晓荣(1972—),女,河北保定人,副教授,博士,主要研究方向为新能源并网技术、直流微网(E-mail: xiaorongzhu@ncepu.edu.cn);

陈朝迁(1994—),男,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电及并网技术、直流微网(E-mail: chen225460@163.com)。

(编辑 李莉)

Voltage fluctuation suppression of DC distribution network based on controllable load and battery energy storage

ZHU Xiaorong, CHEN Chaoqian

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to suppress the voltage fluctuation in DC distribution network, a comprehensive control strategy based on controllable load and BESS (Battery Energy Storage System) is proposed. The factors influencing the DC voltage fluctuation are analyzed specifically, including the variation of distributed power output, load, line parameter and distributed power access location. When the voltage fluctuation is small, the controllable load can be used to suppress the DC voltage fluctuation, which can reduce the capacity of the battery and its charging and discharging times so as to improve the economy of BESS. When the voltage fluctuation is big, due to the limited capacity of the controllable load, the comprehensive control is required with BESS and their parameters are designed. The feedforward control based on disturbance observer is applied to reduce the DC voltage transient fluctuation. The model of DC distribution network is built with MATLAB/Simulink, and the time-domain simulative results show that the proposed comprehensive control strategy can suppress the DC voltage fluctuation caused by the above factors and improve the power quality of each node in DC distribution network.

Key words: DC distribution network; power quality; voltage fluctuation; controllable load; battery energy storage; parameter design; disturbance observer

(上接第87页 continued from page 87)

Power control and mode switching method of power electronic transformer in AC/DC hybrid microgrid

LI Junjie¹, WU Zaijun¹, YANG Shihui², LÜ Zhenyu¹, LIU Haijun², SHEN Yu³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

3. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100053, China)

Abstract: The power control and mode switching method of power electronic transformer in AC/DC hybrid microgrid are proposed. For the islanded mode of AC/DC hybrid microgrid, a droop control method of surplus power is presented to guarantee the mutual support of AC/DC system. In order to realize seamless switching of power electronic transformer under different operation modes, the different operation modes are integrated into one function loop, so as to reduce the transient impact efficiently during the mode switching process. The simulative results show that the proposed power control strategy can not only avoid the over coupling of AC and DC buses, but also provide some mutual support for AC/DC hybrid microgrid. Moreover, the proposed mode switching method can improve the transient characteristics while maintaining the stability performance unchanged.

Key words: hybrid microgrid; power electronic transformer; droop control; mode switching; power control

附录

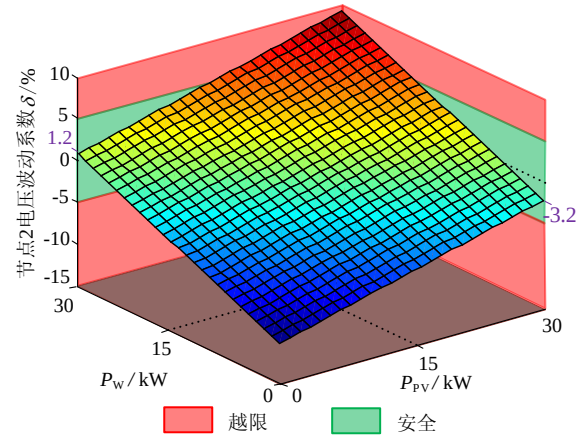
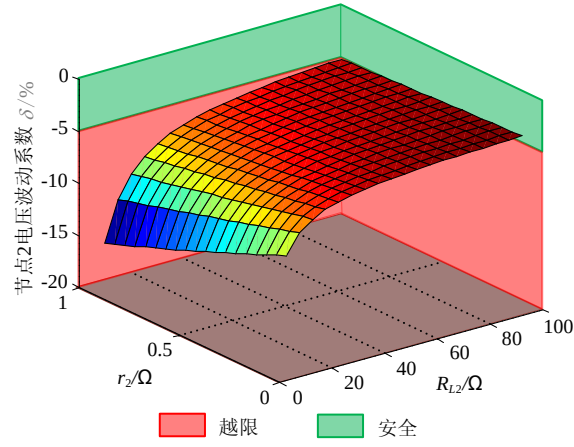


图 A1 不同因素对 δ 的影响

Fig.A1 Influence of various factors on δ

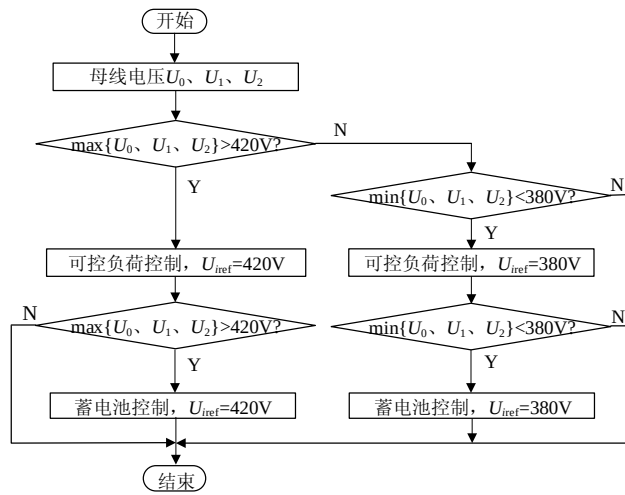
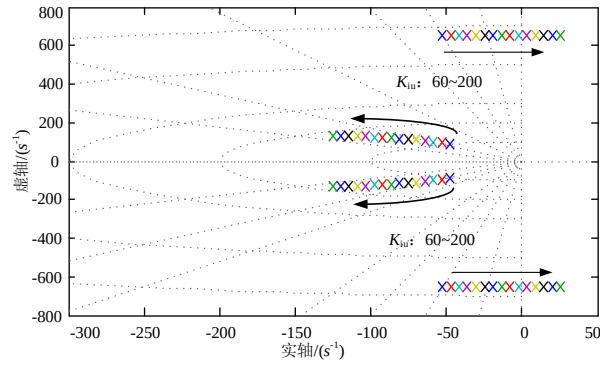
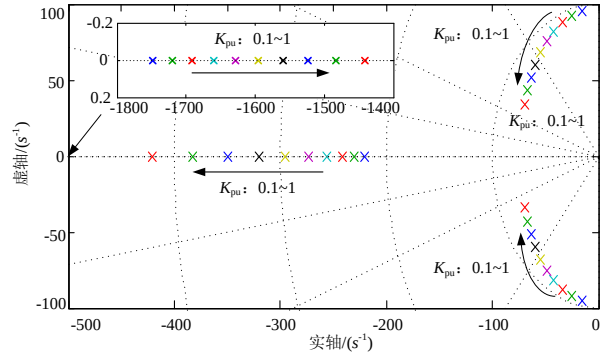


图 A2 可控负荷与蓄电池综合控制流程图

Fig.A2 Flowchart of comprehensive control of controllable load and BESS



(a) $K_{pu}=0.2$, K_{iu} 变化时, 特征值根轨迹



(b) $K_{iu}=60$, K_{pu} 变化时, 特征值根轨迹

图 A3 蓄电池特征值根轨迹

Fig.A3 Eigenvalue root locus of BESS

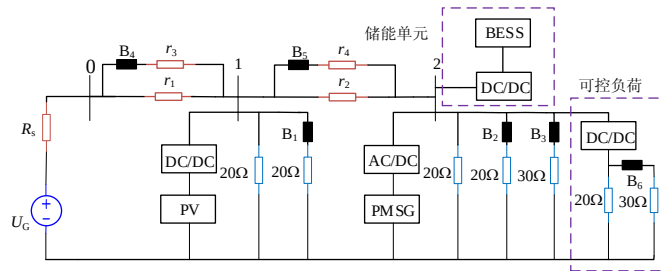


图 A4 直流配电网仿真模型

Fig.A4 Simulation model of DC distribution network

表 A1 直流配电网系统参数

Table A1 System parameters of DC distribution network

子系统	参数	数值
电源	风机功率/ kW	30
	光伏功率/ kW	30
直流母线	额定电压/ V	400
	直流侧电容容量/ mF	5
直流线路	电阻/ Ω	0.28
蓄电池	额定容量/ (A h)	1 000

表 A2 可控负荷与蓄电池的 PI 参数
Table A2 PI parameters of controllable load and BESS

类别	参数	数值
可控负荷	K_{pic}	1.8
	K_{iic}	235
	K_{puc}	0.8
	K_{iuc}	50
蓄电池	K_{pi}	2.3
	K_{ii}	360
	K_{pu}	1
	K_{iu}	60

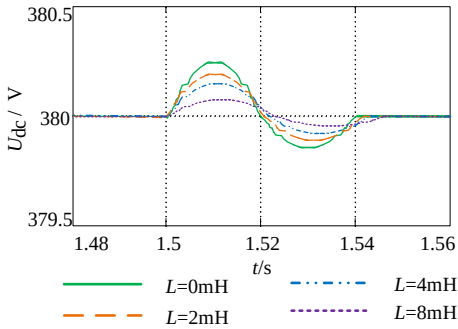


图 A5 线路电感参数对控制的影响

Fig.A5 Influence of line inductance parameters on control

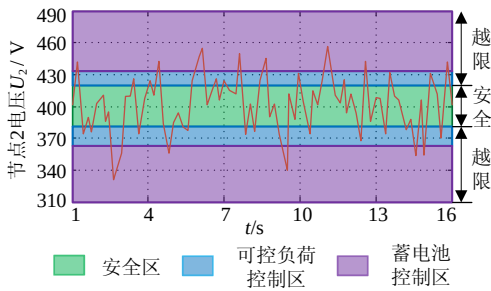


图 A6 直流电压随机波动仿真图

Fig.A6 Simulative waveform of DC voltage random fluctuation