

光储直流配电网灵活虚拟惯性控制策略

刘英培¹,周素文¹,梁海平¹,唐晓骏²,马世英²,谢岩²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003;

2. 中国电力科学研究院有限公司 电网安全与节能国家重点实验室,北京 100192)

摘要:针对光伏渗透率不断提高而带来的直流配电网惯性低的问题,考虑直流配电网储能设备的潜在惯性支持能力,提出光储直流配电网灵活虚拟惯性控制策略。分析了在直流配电网电压动态变化过程中蓄电池储能与电压变化量之间的关系,并通过建立蓄电池荷电状态与直流电压的函数表达式,进一步提出了在直流电压变化时引入双曲正切函数来灵活快速调节蓄电池换流器的控制策略,从而增加系统惯性,提高电能质量。另外,还考虑了蓄电池的充放电极限问题,通过引入反正切函数来限制其过度充放电。最后,对采用灵活虚拟惯性控制策略的直流配电网进行小信号稳定性分析,得到了所提控制策略中关键参数的取值范围。基于MATLAB/Simulink搭建了四端直流配电网仿真系统,验证了在系统功率不平衡后,所提控制策略能利用虚拟惯性控制有效地抑制直流电压波动,从而提高电压质量和暂态稳定性。

关键词:直流配电网;光伏;储能;灵活虚拟惯性;小信号模型

中图分类号:TM 727;TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105037

0 引言

随着常规化石能源的短缺和环境污染问题的凸显,人类已经意识到能源的利用和开发必须从传统化石能源向风能和太阳能等分布式能源过渡^[1]。随着分布式能源大量接入电网,传统交流电网在消纳大规模分布式能源方面越来越力不从心^[2]。

目前,直流配电网已成为众多方案中解决该问题的研究热点^[3]。直流配电网相比于交流配电网,没有频率和功角问题,且具有输送容量大、结构简单、传输损耗低和控制灵活等优势^[4]。此外,光伏等分布式电源为直流电源,采用直流电网可以大幅减少DC/AC换流器的使用,节约成本,提高电网可靠性^[5]。但是,直流配电网的电容惯性远小于交流配电网中同步发电机所具有的机械惯性^[6]。当直流配电网中功率有较大波动时,直流母线电压也会随之有较大波动,这给电压敏感的负荷和分布式能源带来了不利的影响^[7-9]。而且,间歇性光伏发电单元产生的阶跃变化和随机波动会导致直流母线电压和配电网的功率发生剧烈波动。直流配电网中换流器普遍采用电压下垂控制,通过发生扰动时功率的自动分配来确保其电压稳定^[10]。但是,在功率波动时,换流器的输出功率必须根据下垂曲线来接近新的稳定工作点。因此,当直流配电网中有明显的功率不平衡时,仅凭借直流电容不能有效地减小直流电压的突变率,必须将虚拟惯性控制引入直流配电网来提高其电压质量。

虽然电力电子换流器使得风力发电机的机械和电气系统之间解耦^[11],阻止了风机响应系统电压变

化,但是可以通过附加惯性控制器释放风机转子中存储的动能,增加电网惯性,平抑电压波动。文献[5]通过在风机上附加虚拟惯性控制策略,有效地解决了风电输出功率不确定带来的直流电压波动的问题。而光伏属于非旋转静止元件,无法像风机一样平抑电压波动^[12]。文献[13]通过让光伏单元偏离最大输出功率点来调节功率产生虚拟惯性。该方法虽然增大了系统惯性但没有充分利用光伏发电,降低了光伏发电效率。将光伏单元与一定的储能单元相结合,可以减小光伏功率的波动对电网的影响。但随着光伏渗透率的不断提高,光储静止元件缺乏惯性是无法忽略的问题^[14]。因此,充分利用储能快速充放电的能力为系统提供惯性支持对保证光伏发电效率、提高直流电压稳定至关重要。

考虑到直流配电网储能设备的潜在惯性支持能力,本文提出了一种蓄电池提供灵活虚拟惯性的控制策略。首先,建立了蓄电池荷电状态(SOC)与直流电压的函数关系表达式,在此基础上提出了一种蓄电池产生灵活虚拟惯性的控制策略;然后,考虑了蓄电池的充放电极限问题,通过划分蓄电池工作区并引入反正切函数来限制其过度充放电;最后,采用小信号稳定性分析研究蓄电池采用虚拟惯性控制的直流配电网稳定性问题。

1 光储直流配电网结构

本文所研究的光储直流配电网拓扑结构如附录中图A1所示,该系统主要由光伏单元、储能单元、交流负荷和交流电网四部分组成。

(1)光伏单元:采用单向DC/DC换流器(即图A1中PV-DC)接入直流配电网,运行时采用最大功

率点跟踪(MPPT)控制,特殊情况下(如电压过高)也可以采用降功率方式运行。

(2)储能单元:通过双向DC/DC换流器(即图A1中B-DC)接入直流配电网,换流器按下垂控制进行直流电压调节。本文选择较为经济的铅酸蓄电池作为储能元件。

(3)交流负荷:通过电压型DC/AC换流器(即图A1中L-VSC)接入直流配电网,其由恒功率负荷组成。

(4)交流电网:在电压型DC/AC换流器(即图A1中G-VSC)的控制下,按照下垂控制完成交直流功率交换和直流电压调节。

2 直流配电网的虚拟惯性控制

2.1 直流配电网惯性的定义

在交流系统中,惯性反映了系统在阻止频率发生突变方面的能力^[15]。交流同步发电机的惯性时间常数 H_s 一般定义为^[5]:

$$H_s = W_k / S_N \quad (1)$$

其中, W_k 和 S_N 分别为额定转速下转子中储存的动能和发电机的额定发电容量。

与交流系统类似,直流系统的惯性反映了系统在抑制电压发生突变方面的能力^[16]。类比式(1),直流电网中的惯性时间常数 H_{dc} 可定义为^[17]:

$$H_{dc} = \frac{W_e}{S_{N,dc}} = \frac{C}{2} \frac{U_N^2}{S_{N,dc}} \quad (2)$$

其中, W_e 为直流母线在额定电压下其电容中储存的电能; $S_{N,dc}$ 为直流母线额定功率传输容量; C 和 U_N 分别为直流电网的电容和直流母线的额定电压。

实际直流电网的电容 C 很小^[5],从式(2)可知配电网在受到一定的扰动时惯性较小,导致电压波动较大,因而对其电压质量产生了重要影响。

2.2 直流配电网虚拟惯性分析

图1给出了直流配电网中换流器直流侧的等效电路。图中, P_R 和 P_s 分别为新能源发电单元及负荷单元需要的总功率和某一功率源(如储能单元等)提供的功率; P_c 和 u_{dc} 分别为流入直流侧电容的功率和直流电压。

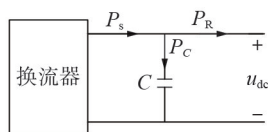


图1 直流电容侧的功率关系

Fig.1 Power relationship of DC capacitor side

由图1可得:

$$P_s - P_R = P_c = C u_{dc} du_{dc} / dt \quad (3)$$

由式(3)易知,当直流电压保持恒定时,换流器

直流侧电容不充电也不放电,应有 $P_s = P_R$ 成立。当电网功率发生波动时,直流电容越小,电压变化率就越大,进而电压波动得越严重。

由于直流配电网中电容很小,这使得系统受到扰动时电能质量较差。可通过在换流器上施加控制策略,以达到在直流侧并联虚拟电容的效果。

当直流电压变化时,换流器采用虚拟惯性控制可使功率源提供辅助功率 ΔP_s , ΔP_s 可表示为^[18]:

$$\Delta P_s = C_{vir} u_{dc} du_{dc} / dt \quad (4)$$

其中, C_{vir} 为在换流器直流侧施加虚拟惯性控制产生的虚拟电容。

若换流器采用虚拟惯性控制,当负荷功率波动 ΔP_R 时,直流电容侧的功率方程为:

$$P_s - (P_R + \Delta P_R) = P_c + \Delta P_s \quad (5)$$

结合式(3)、(4)可得:

$$P_c + \Delta P_s = (C + C_{vir}) u_{dc} du_{dc} / dt \quad (6)$$

由式(5)、(6)可知,负荷功率波动时,通过附加虚拟惯性控制,直流电网的电容从 C 增加为 $C + C_{vir}$,解决了实际直流电网中电容过小的问题,从而提高了电压质量。根据式(2)可知,施加虚拟惯性控制时的惯性时间常数为:

$$H_{dc} = \frac{C + C_{vir}}{2} \frac{U_N^2}{S_{N,dc}} \quad (7)$$

由式(7)可知,换流器通过虚拟惯性控制增加了直流配电网的惯性时间常数。

2.3 储能元件的虚拟惯性分析

蓄电池正常运行时近似为恒压充放电。当蓄电池充满电时,其额定容量为 Q_N ,蓄电池放电过程中电流为 i_B ,则SOC值 γ_{soc} 可表示为^[19-20]:

$$\gamma_{soc} = \frac{Q_N - \int i_B dt}{Q_N} = \frac{Q_r}{Q_N} \quad (8)$$

其中, Q_r 为蓄电池的剩余电量。

结合式(8),蓄电池存储的能量 W_B 可表示为:

$$W_B = \int u_B i_B(t) dt = u_B Q_N \gamma_{soc_0} \quad (9)$$

其中, u_B 和 γ_{soc_0} 分别为蓄电池的电压和初始SOC。

蓄电池通过建立 γ_{soc} 与直流电压 u_{dc} 的函数关系,可以实现在电压波动时快速吸收或释放能量,增加电网惯性和减缓电压波动的目的。

为了建立上述函数表达式,让蓄电池发出(吸收)的能量等于虚拟电容发出(吸收)的能量,即:

$$W_B = \int u_B i_B(t) dt = \int u_B Q_N d(1 - \gamma_{soc}) = \int C_{vir} u_{dc} du_{dc} \quad (10)$$

$$C_{vir} = \frac{u_B Q_N d(1 - \gamma_{soc})}{u_{dc} du_{dc}} \quad (11)$$

根据式(9)和式(11),蓄电池换流器产生的虚拟电容为:

$$C_{\text{vir}} = \frac{u_B Q_N d(1-\gamma_{\text{soc}})}{u_{\text{dc}} du_{\text{dc}}} \frac{\gamma_{\text{soc}_0} C u_{\text{dc}}}{\gamma_{\text{soc}_0} C u_{\text{dc}}} = -\frac{C u_{\text{dc}} W_B d\gamma_{\text{soc}}}{2\gamma_{\text{soc}_0} W_e du_{\text{dc}}} \approx -C \frac{u_{\text{dc}} \Delta\gamma_{\text{soc}}}{\gamma_{\text{soc}_0} \Delta u_{\text{dc}}} \frac{W_B}{2W_e} = -C \frac{k_B W_B}{2W_e} \quad (12)$$

其中, $\Delta\gamma_{\text{soc}}$ 和 Δu_{dc} 分别为蓄电池 SOC 变化量和直流电压变化量; $k_B = (\Delta\gamma_{\text{soc}}/\gamma_{\text{soc}_0})/(\Delta u_{\text{dc}}/u_{\text{dc}})$, 为蓄电池 SOC 变化率与直流电压变化率的比值。

通过式(12)可知, 蓄电池虚拟惯性大小不仅取决于直流电网的电容 C , 还取决于蓄电池 SOC 变化率与直流电压变化率的比值 k_B 和蓄电池存储的能量 W_B 与电容存储的电能量 W_e 的比值。通常蓄电池存储的能量大于直流电容存储的电能量, 即 $W_B/W_e > 1$ 。若蓄电池 SOC 变化率远大于直流电压变化率, 即 $|k_B| \gg 1$, 则经过蓄电池的快速吸收或释放能量, 可虚拟出比直流电容更大的惯量。

3 光储直流配电网灵活虚拟惯性控制策略

本文在传统下垂控制的基础上, 根据式(12)所定义的虚拟电容表达式, 提出模拟电容充放电的灵活虚拟惯性控制策略。即将电压波动信号引入蓄电池换流器控制部分, 通过附加灵活虚拟惯性控制来改变电流参考值, 使蓄电池输出功率迅速发生改变, 从而给予电网一定的惯性支持。图2为蓄电池换流器附加灵活虚拟惯性控制结构图。图中, k_E 为下垂系数; I_B^* 和 U_{dc}^* 分别为蓄电池电流和直流电压的参考值。

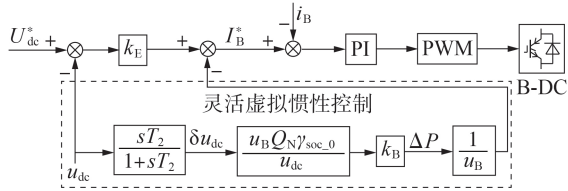


图2 蓄电池换流器附加灵活虚拟惯性控制结构图

Fig.2 Structure diagram of additional flexible virtual inertia control for battery converter

由于直流电压变化率 du_{dc}/dt 的检测易受谐波和噪声的干扰, 本文以暂态电压变化量 δu_{dc} (δ 表示暂态分量) 代替 du_{dc}/dt 的检测。考虑到 k_B 对虚拟惯性控制的调节作用, 可以通过调节 k_B 的值减小电压变化率。当功率波动时, 传统下垂控制下电压会偏离运行值, 此时电压变化率很大, 需要增加惯性, 抑制电压变化。而当电压渐趋于新的稳定值时, 电压变化率较小, 需要减小惯性, 使电压尽快恢复稳定。根据上述分析, 本文拟合了电压变化率与 k_B 之间的关系曲线, 如图3所示。图中, $x = |du_{\text{dc}}/dt| / |du_{\text{dc}}/dt|_{\text{max}}$, $|du_{\text{dc}}/dt|_{\text{max}}$ 为电压变化率的最大值。

拟合曲线表达式如式(13)所示。

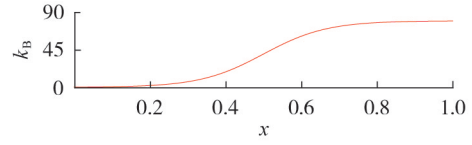


图3 参数 k_B 随电压变化率变化的曲线

Fig.3 Curve of voltage variation rate vs. k_B

$$k_B = 0.5k_{B_{\text{max}}} \tanh(6x - 3) + 0.5k_{B_{\text{max}}} \quad (13)$$

其中, $k_{B_{\text{max}}}$ 为 k_B 的最大值, 具体取值由第5节中的稳定性分析确定。

由双曲正切函数曲线可知, 当电网在正常运行且电压变化率较小时, k_B 取值较小, 有利于系统的稳定。而当电压变化率较大时, k_B 的值快速增大, 有利于快速调节蓄电池释放能量, 减小电压变化。与 k_B 取值不变的固定虚拟惯性相比, 基于双曲正切的灵活虚拟惯性控制可以根据电压变化率自适应调节惯性大小, 减缓电压波动, 提高电压稳定性。但当电压波动较大, 蓄电池 SOC 处于极限状态时, 有可能对蓄电池造成损坏, 所以需要在虚拟惯性控制策略中考虑 SOC。

4 考虑蓄电池 SOC 的虚拟惯性控制策略

考虑到蓄电池充放电能力对虚拟惯性控制策略而言至关重要, 合理使用蓄电池需要确定蓄电池工作区。根据文献[19], 蓄电池工作区可划分为:

$$\gamma_{\text{soc}} = \begin{cases} [0.1, a] & \text{放电极限区} \\ [a, b] & \text{电池正常区} \\ [b, 0.9] & \text{充电极限区} \end{cases} \quad (14)$$

其中, a 、 b 分别为放电极限区的上界值和充电极限区的下界值。本文中取 $a=0.25$ 、 $b=0.75$ 。

本文中蓄电池 SOC 的虚拟惯性控制主要是指蓄电池处于充放电极限区, 而超出此范围蓄电池不能再进行充放电, 否则会影响其寿命, 本文不再讨论。

从 k_B 的定义式中可以得到, 当直流电压变化一定时, k_B 越小蓄电池 SOC 变化就越少, 即蓄电池充放电功率越少。本文通过在极限区建立蓄电池 SOC 与 k_B 的函数关系, 即通过蓄电池 SOC 来决定 k_B 的取值, 从而达到减少输出功率、保护蓄电池安全稳定的目的。

考虑到反正切函数无限接近最值的特性, 本文选择通过反正切函数来建立蓄电池 SOC 与 k_B 的函数关系, 如式(15)所示。

$$k_B = \begin{cases} k_{B0} + k_1 \arctan[k_2(\gamma_{\text{soc}} - a)] & 0.1 \leq \gamma_{\text{soc}} \leq a \\ k_{B0} - k_1 \arctan[k_2(\gamma_{\text{soc}} - b)] & b \leq \gamma_{\text{soc}} \leq 0.9 \end{cases} \quad (15)$$

其中, k_1 和 k_2 为调整系数, 需要根据具体实际情况来确定; k_{B0} 为蓄电池处于极限区且需要限制充放电时 k_B 的最大值, 将在6.4节进行具体分析。

当蓄电池处于充放电极限区时, 由于反正切函

为步长,增加到100。观察图5可知,随着 k_B 的增加,根轨迹逐渐向虚轴靠近,当 $k_B=85$ 时,出现了实部为正的实特征根,系统不稳定。因此当 k_B 小于85时,附加虚拟惯性控制的光储直流配电网可以稳定运行。

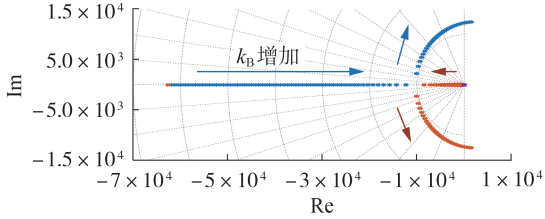


图5 参数 k_B 变化时的根轨迹

Fig.5 Root locus with variation of k_B

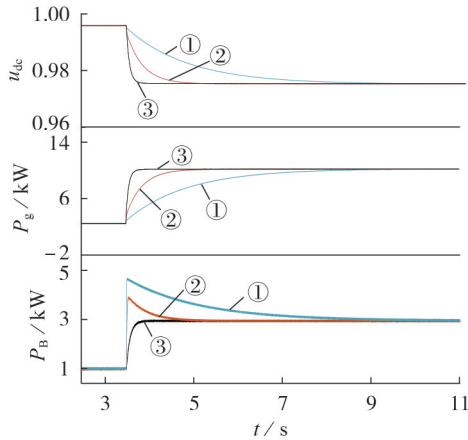
6 仿真分析

本文利用MATLAB/Simulink仿真软件搭建了如附录中图A1所示的四端直流配电网仿真系统。仿真过程中光照强度恒为 1000 W/m^2 ,温度恒为 25°C ,光伏运行在MPPT状态,约发出功率 16.5 kW 。

6.1 电池正常区下负荷突增与突减时的系统惯性响应

(1) 电池正常区下负荷突增时的系统惯性响应。

仿真过程中,初始负荷为 20 kW ,交流电网向直流侧注入功率约 2.5 kW ,此时电压维持在额定值附近; $t=3.5 \text{ s}$ 时,交流负荷突增 10 kW 。蓄电池换流器分别采用无虚拟惯性控制、固定虚拟惯性控制和灵活虚拟惯性控制进行仿真对比。此次仿真中蓄电池初始SOC为50%,并规定蓄电池放电为其正方向。图6给出了不同控制策略下的直流电压 u_{dc} 、交流电网输出功率 P_g 和蓄电池输出功率 P_B 的变化曲线。图中, u_{dc} 为标幺值,后同。



① 灵活虚拟惯性, ② 固定虚拟惯性, ③ 无虚拟惯性

图6 电池正常区下负荷突增后系统仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms of system after sudden load increase in normal area of battery

由图6可知,①当负荷突增,蓄电池采用无虚拟惯性控制时,系统因缺乏惯性,直流电压迅速降低到

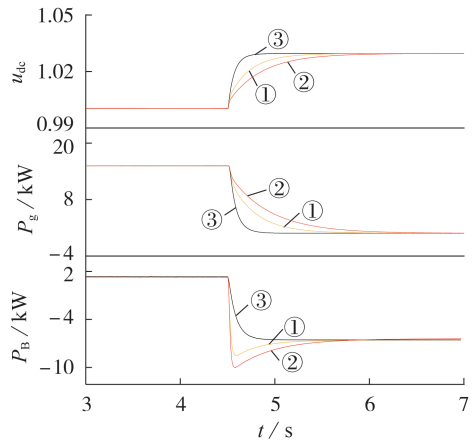
0.976 p.u. ,电能质量较差;与无虚拟惯性控制相比,固定虚拟惯性控制下的电压下降速度得到一定的降低;而采用灵活虚拟惯性控制时,电压下降明显变缓,电压质量得到显著提升。②当负荷突增时,由于采用固定虚拟惯性控制快速释放功率,减缓了交流电网向直流配电网注入功率的上升趋势,对直流电网的功率平衡恢复和电压波动抑制起到了一定的积极作用;而与固定虚拟惯性控制相比,采用灵活虚拟惯性控制进一步减缓了交流电网的功率输出,因此对交流电网稳定性的影响较小。③当负荷突增,采用灵活虚拟惯性控制时,蓄电池能迅速增大输出功率至 4.8 kW ,比固定虚拟惯性控制时的 3.9 kW 大 0.9 kW ,减少了功率差额,明显抑制了电压突变,使直流电网具有较大的惯性。

(2) 电池正常区下负荷突减时系统惯性响应。

仿真过程中,初始负荷为 30 kW ; $t=3.5 \text{ s}$ 时,负荷突减 10 kW 。附录中图A3给出了负荷突减时的仿真曲线,其与负荷突增时分析过程类似,不再赘述。由图6和图A3可知,本文提出的蓄电池附加灵活虚拟惯性控制策略提高了直流配电网的惯性,且通过灵活改变 k_B 的大小,可以迅速吸收或释放蓄电池功率,快速平抑电网功率波动。

6.2 电池充电极限区下负荷突减时系统惯性响应

仿真过程中, $t=4.5 \text{ s}$ 时,负荷突减 20 kW ,而且此时蓄电池处于充电极限区,为了更好地展示式(15)中反正切函数对 k_B 的影响,本次仿真中初始SOC设为75%。蓄电池换流器分别采用无虚拟惯性控制、考虑SOC的虚拟惯性控制和不考虑SOC的虚拟惯性控制(即 k_B 固定为 k_{B0} 时的虚拟惯性控制)进行仿真对比。电池充电极限区下负荷突减后系统仿真波形如图7所示。



① 考虑 SOC 的虚拟惯性
② 不考虑 SOC 的虚拟惯性, ③ 无虚拟惯性

图7 电池充电极限区下负荷突减后系统仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms of system after sudden load reduction in charging limit area of battery

从图7中可以看出,在交流负荷突减时,直流电

网因缺乏惯性,直流电压迅速增加到1.029 p.u.;而采用考虑SOC的虚拟惯性控制时,电压上升趋势得到一定的减缓。与采用不考虑SOC的虚拟惯性控制相比,由于蓄电池处于充电极限区,其充电功率受到反正切函数的限制,所以直流电压曲线上升幅度大,而且由交流电网输出功率 P_g 曲线可知,此时需要交流电网通过快速减少功率输出来平衡直流配电网的功率过剩。

综上,当负荷突减后,在反正切函数的作用下,蓄电池吸收的功率受到限制,从而保证了在充电极限区下蓄电池的安全和稳定。

6.3 稳定性分析结果验证

从图6和附录中图A3所示的仿真结果可知,电网的虚拟惯性随着 k_B 的增大而增大。然而根据本文的稳定性分析可知, k_B 过大会引起电网稳定性问题,导致系统失稳。图8给出了系统稳定性测试结果,测试条件与图6一致。

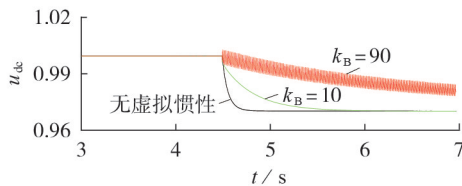


图8 系统稳定性测试结果

Fig.8 Test results of system stability

本文通过稳定性分析得到 k_B 的取值范围应小于85,从图8可知:当 k_B 分别取0和10时,随着 k_B 的增大,直流电压更加平缓地降落至稳定值;当 $k_B=90$ 时,直流电压发生高频振荡,系统稳定性遭到破坏。因此选择灵活虚拟惯性控制参数时要始终确保 k_B 小于85,以保持系统的稳定。

6.4 参数 k_{B0} 取值问题的分析

通过附录中图A4仿真对比 k_B 不同取值下直流电压波动情况,可知其取值为10时直流电压波动已有明显减缓,继续增大其取值,直流电压波动减弱能力的增幅逐渐下降且电压调整时间逐渐增大。考虑到参数 k_{B0} 主要针对系统小扰动波动而且还要考虑蓄电池处于极限区时 k_B 的取值不能大,本文综合上述情况选择 $k_{B0}=10$ 。

7 结论

本文提出了光储直流配电网中蓄电池附加灵活虚拟惯性控制策略,该控制策略对配电网的功率平衡恢复和电压波动抑制起到了一定的积极作用。通过理论推导和仿真验证得到了以下结论:

(1)本文通过建立蓄电池SOC与直流电压的函数关系,在传统下垂控制上附加灵活虚拟惯性控制来改变蓄电池电流参考值,从而给予电网一定的惯性支持;

(2)一方面提出利用直流电压变化率变化虚拟惯性的灵活虚拟惯性控制策略,另一方面考虑了蓄电池的充放电极限问题,通过反正切函数的作用,避免蓄电池深度充放电,在充分利用其容量的前提下,确保了系统的安全稳定运行;

(3)建立了光储直流配电网小信号模型并对其进行了稳定性分析,明确了参数 k_B 的变化范围以及其对系统稳定性的影响。

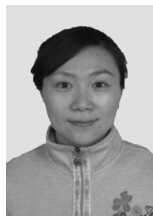
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 梅哲,詹红霞,杨孝华,等.考虑电流保护的配电网电动汽车与分布式能源配合优化运行策略[J].电力自动化设备,2020,40(2):89-102.
MEI Zhe,ZHAN Hongxia,YANG Xiaohua,et al. Optimal operating strategy of distribution network based on coordination of electric vehicle and distributed energy resource considering current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(2):89-102.
- [2] HEDAYATI-MEHDIA BADI M,ZHANG J,HEDMAN K W. Wind power dispatch margin for flexible energy and reserve scheduling with increased wind generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2015,6(4):1543-1552.
- [3] LI Y,HE L,LIU F. Flexible voltage control strategy considering distributed energy storages for DC distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(1):163-172.
- [4] 李斌,刘海金,孔祥平,等.直流配电网运行控制策略分析及展望[J].电力建设,2018,39(11):96-108.
LI Bin,LIU Haijin,KONG Xiangping,et al. Analysis and prospect of control strategies for DC distribution systems[J]. Electric Power Construction,2018,39(11):96-108.
- [5] 朱晓荣,蔡杰,王毅,等.风储直流微网虚拟惯性控制技术[J].中国电机工程学报,2016,36(1):49-58.
ZHU Xiaorong,CAI Jie,WANG Yi,et al. Virtual inertia control of wind-battery-based DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(1):49-58.
- [6] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等.直流配电网研究现状与发展[J].电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
SUN Pengfei,HE Chunguang,SHAO Hua,et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):64-73.
- [7] 黄馨仪.直流配电网虚拟惯性控制技术研究[D].保定:华北电力大学,2019.
HUANG Xinyi. Research on virtual inertia control technology of DC distribution network[D]. Baoding:North China Electric Power University,2019.
- [8] 朱晓荣,孟凡奇.含虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析[J].电网技术,2020,44(1):208-218.
ZHU Xiaorong,MENG Fanqi. Stability analysis of DC micro-grid with virtual inertial control[J]. Power System Technology, 2020,44(1):208-218.
- [9] 谢志云.直流微电网惯性控制及其稳定性分析研究[D].保定:华北电力大学,2018.
XIE Zhiyun. Inertia control and stability analysis of DC microgrid[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2018.
- [10] 王毅,黑阳,付媛,等.基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J].电力系统自动化,2017,41(8):116-124.
WANG Yi,HEI Yang,FU Yuan,et al. Adaptive virtual iner-

- tia control of DC distribution network based on variable droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(8):116-124.
- [11] WANG Y, MENG J, ZHANG X. Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2):565-574.
- [12] 张祥宇, 李凌斐, 边子轩. 基于混合静止能量的虚拟转动惯量控制技术[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11):50-56.
ZHANG Xiangyu, LI Lingfei, BIAN Zixuan. Virtual moment of inertia control technology based on hybrid static energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11):50-56.
- [13] ZHANG X, GAO Q, HU Y. Active power reserve photovoltaic virtual synchronization control technology[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2020, 6(2):1-6.
- [14] 张祥宇, 杨黎, 朱晓荣, 等. 光储发电系统的虚拟转动惯量控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9):109-115.
ZHANG Xiangyu, YANG Li, ZHU Xiaorong, et al. Virtual rotational inertia control of PV generation system with energy storage devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9):109-115.
- [15] WANG Y, WANG C, XU L, et al. Adjustable inertial response from the converter with adaptive droop control in DC grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3):3198-3209.
- [16] 邹培根, 孟建辉, 王毅, 等. 一种直流微电网的灵活虚拟惯性控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(6):56-62.
ZOU Peigen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. A flexible virtual inertial control strategy for DC microgrid[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6):56-62.
- [17] 伍文华, 陈燕东, 罗安, 等. 一种直流微网双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):360-372.
WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An, et al. A virtual inertial control strategy for bidirectional grid-connected converters in DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):360-372.
- [18] 王琛. 直流配电网的分散自律控制研究[D]. 保定:华北电力大学, 2018.
WANG Chen. Research on decentralized and self regulating control of DC distribution network[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2018.
- [19] 王琛, 孟建辉, 王毅, 等. 考虑蓄电池荷电状态的孤岛直流微网多源协调控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(1):160-168.
WANG Chen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Multi-source coordinated control strategy considering battery's SOC for islanded DC microgrid[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(1):160-168.
- [20] 孟建辉, 彭嘉琳, 王毅, 等. 考虑储能荷电状态及频率恢复特性的改进型灵活虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6):100-107.
MENG Jianhui, PENG Jialin, WANG Yi, et al. Improved flexible virtual inertial control considering SOC of energy storage and characteristics of frequency recovery[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6):100-107.

作者简介:



刘英培

刘英培(1982—),女,河北保定人,副教授,博士,主要研究方向为直流输电技术等(E-mail:liuyingpei_123@126.com);

周素文(1994—),男,安徽宣城人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电网电压稳定控制等(E-mail:1015178060@qq.com);

梁海平(1979—),男,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为新能源发电与并网技术、电力系统安全防御与恢复控制等。

(编辑 李玮)

Flexible virtual inertial control strategy of photovoltaic-energy storage DC distribution network

LIU Yingpei¹, ZHOU Suwen¹, LIANG Haiping¹, TANG Xiaojun², MA Shiyang², XIE Yan²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Grid Security and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the problem of low inertia of DC distribution network caused by the continuous increase of photovoltaic penetration rate, a flexible virtual inertia control strategy for photovoltaic-energy storage DC distribution network is proposed considering the potential inertia support capacity of energy storage equipment in DC distribution network. The relationship between battery energy storage and voltage variation in the dynamic process of DC distribution network voltage changes is analyzed, and the functional expression for state of charge of battery and DC voltage is established. Furthermore, a hyperbolic tangent function is introduced when DC voltage changes to flexibly and quickly adjust the control strategy of the battery converter, so as to increase the system inertia and improve the power quality. Meanwhile, considering the charging and discharging limit of the battery, the excessive charging and discharging of battery is restricted by introducing the arctangent function. Finally, the small-signal stability analysis of DC distribution network using the flexible virtual inertial control strategy is adopted, and the value range of key parameters in the proposed control strategy is obtained. A four-terminal DC distribution network simulation system is established based on MATLAB/Simulink, and it is verified that the proposed control strategy can effectively suppress DC voltage fluctuation by using virtual inertia control after system power is unbalanced, thereby improving voltage quality and transient stability.

Key words: DC distribution network; photovoltaic; energy storage; flexible virtual inertia; small-signal model

附录

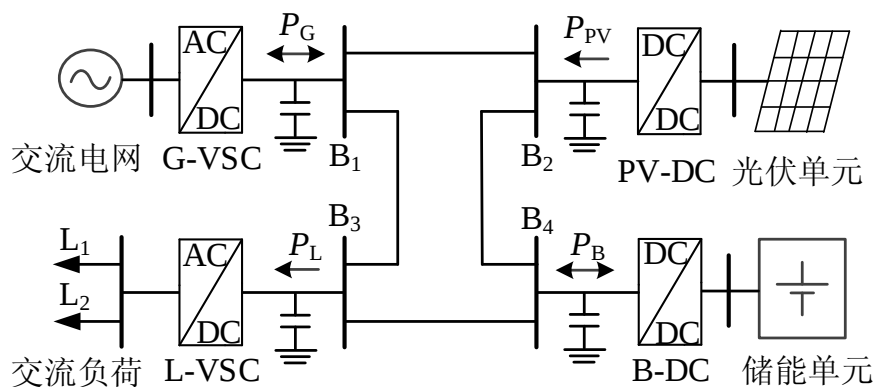


图 A1 光储直流配电网结构示意图

Fig.A1 Schematic diagram of photovoltaic-energy storage DC distribution network structure

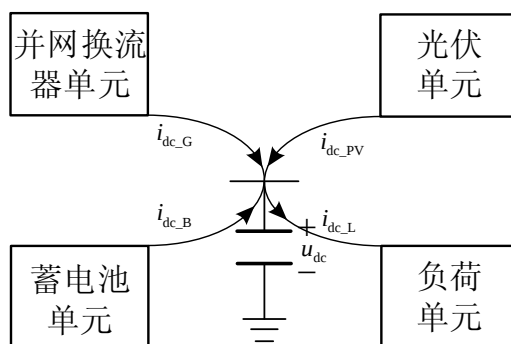


图 A2 直流配电网电流关系图

Fig.A2 Diagram of DC distribution network current relationship

表 A1 光储直流配电网概况

Table A1 Overview of photovoltaic-energy storage DC distribution network

元件类别	参数描述
直流母线	额定电压 400V, 直流母线电容 1000μF
光伏	额定容量 20kW
交流负荷	额定容量 30kW, 额定电压 380V
交流电网	额定电压 380V, 额定容量 50kV · A
蓄电池	额定电压 120V, 额定容量 100A · h
G-VSC	电压下垂控制: $k_G=1/120$, $U_{dc}^*=1\text{p.u.}$ 额定容量 15kW, $L_E=0.25\text{mH}$
B-DC	下垂系数 $k_B=1$, $U_{dc}^*=1\text{p.u.}$, $T=0.05\text{s}$, $G_P=8$, $G_I=300$ 额定容量 10kW
状态初值 (稳定性分析)	$U_{dc0}=0.999\text{p.u.}$, $\theta_0=0.099$, $D_0=0.4$, $k_{E0}=1$, $i_{B0}=5\text{A}$, $P_{PV}=16.5\text{kW}$, $P_L=10\text{kW}$

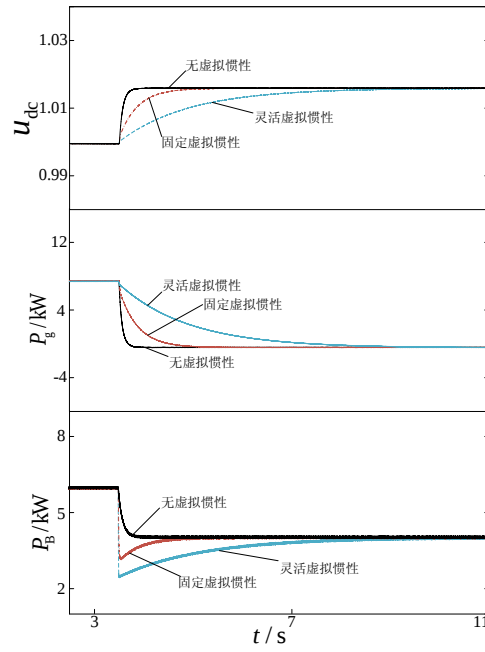


图 A3 电池正常区下负荷突减后系统仿真波形

Fig.A3 Simulative waveform of system after sudden load reduction in normal battery area

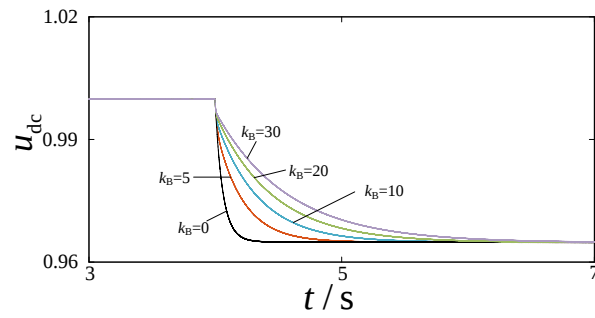


图 A4 k_B 不同取值时的直流电压波动曲线

Fig.A4 Curve of DC voltage fluctuation with different values of k_B