

一种适用于多电压等级直流配电网的分散式双向电压支撑控制方法

司鑫尧¹,赵竞涵²,于森²,刘海涛³,熊雄³,韦巍²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 210003;

2. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;

3. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:新能源发电、储能系统、直流负载接入直流配电网,可减少DC/AC转换环节,简化控制,提高系统运行效率,故近些年来直流配电网受到了广泛关注。采用电力电子装置构建多电压等级直流配电网,具有更加灵活的拓扑结构、更加多变的运行形式及更高的供电可靠性,但同时给配电网的稳定高效运行带来了诸多挑战。针对多电压等级直流配电网中子网互联的双向DC/DC变换器,基于变换器两端口电压,提出了一种分散式归一化电压平方差控制方法,结合储能变换器的功率-电压平方下垂控制,实现不同电压等级母线电压控制归一化视角下相等,为各电压等级母线提供不间断的电压支撑,并可使系统在储能切入/切出、电压等级拓展、接入中压直流配电网等多种运行模式间灵活切换。对所提控制方法的可行性与稳定性进行了分析,并基于MATLAB/Simulink对其有效性进行了仿真验证。

关键词:双向DC/DC变换器;分散控制;电压支撑;直流配电网;多模式运行

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105044

0 引言

分布式新能源发电单元如光伏、风机等大量接入,给配电网的安全稳定运行带来了极大的挑战^[1]。由于光伏等典型分布式新能源所具有的内在直流特性,传统交流配电网并不是新能源接入的最佳选择,相较而言,直流配电网省略了大量的DC/AC转换环节,可高效接入分布式发电单元,提升系统的运行效率^[2]。同时,随着电动汽车、LED照明、电脑的不断推广,以及数据中心、通信基站等“新基建”的不断建设,电力系统负荷侧的直流化特性愈加明显,对供电可靠性与供电质量的要求逐渐提高^[3],而直流配电网无需考虑频率与无功功率问题,控制相对简单,供电容量更大,线路损耗更小,因此具有良好的应用与研究前景^[4]。

基于上述源、荷直流化的发展背景,为了进一步提升供电质量,柔性直流技术被引入配电领域^[5],其关键设备为基于电力电子技术开发的柔性互联装置FID(Flexible Interconnection Device)^[6]。FID可对连接端口的电压、功率进行连续调节,实现多种运行模式的无缝切换,在系统发生故障时对故障进行快速隔离,对受影响区域建立电压支撑,对重要负荷进行转供以保障不间断供电^[7-9]。

对直流配电领域电压支撑进行研究,通过仿照

交流变压器的恒变比特性,构建恒变比电力电子直流变压器,实现直流母线DCB(DC Bus)之间的相互支撑,具有良好的研究价值以及应用前景。已有相关文献通过设计相应的控制策略,可利用隔离型双向DC/DC变换器(BDDC)实现恒变比电力电子直流变压器的部分功能,但设备的造价高昂,控制相对复杂^[10],而诸如Buck、Boost、Buck-Boost等基本DC/DC变换器,可以在开环控制的情况下近似构造一台恒变比电力电子直流变压器^[11],但其开环控制方式无法良好地应对新能源出力波动、负荷切入/切出带来的系统功率波动,采用常见的直流电压-直流电流下垂控制只能建立一侧直流母线电压,当系统拓扑发生变化,需要改变支撑方向时,电压支撑策略也需要切换^[12]。文献[13]在DC/DC变换器两侧均配置了电压控制器,通过检测系统的运行状态进行切换,考虑到系统状态检测的准确性与控制器切换的暂态过程,系统运行风险大幅增加。

针对以上问题,本文提出了一种针对BDDC的双向电压支撑控制方法,通过对BDDC两端口电压进行归一化处理,利用电压平方差控制将不同电压等级的直流母线控制至同一归一化电压下,结合储能(ES)的功率-电压平方下垂控制可以在无需切换控制器的情况下实现系统在多种运行模式间的转换,是一种完全分散式的统一控制方法,可以灵活应用于多电压等级直流配电网的柔性互联运行中,实现多种运行工况下不同电压等级直流母线间的双向支撑。

收稿日期:2021-02-25;修回日期:2021-04-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904700)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904700)

1 多电压等级直流配电网

直流配电网具有控制简单、容量大、效率高、对分布式新能源友好等特性,多电压等级直流配电网可进一步提升直流系统的灵活性,便于不同电压等级的新能源发电单元、储能与直流负荷的接入。不同电压等级直流母线间通过电力电子装置互联,在紧急情况下可为其他区域提供功率或电压支撑,提升系统的运行稳定性^[14]。

本文所研究的多电压等级直流配电网的拓扑结构如图1所示,其由 N 条不同电压等级的直流母线(DCB₁—DCB _{N})组成,直流母线之间通过 $N-1$ 台BDDC呈辐射状连接,储能(ES₁—ES _{N})、分布式电源(DG₁—DG _{N})、直流负荷(L₁—L _{N})直接或者通过间接电力电子变换器接入相应的直流母线,与母线共同构成子网系统(SBS)。

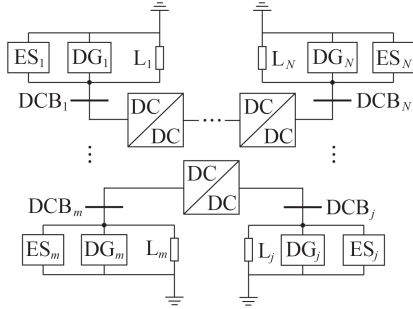


图1 多电压等级直流配电网的拓扑结构

Fig.1 Topological structure of multi-voltage level DC distribution network

在正常运行情况下,上述配电网的各直流母线接入中压配电网运行,在故障情况下可通过BDDC进行转供,储能与分布式电源可在紧急情况下提供电压或功率支撑。

2 系统建模与分散控制

本文所研究的多电压等级直流配电网通过BDDC实现柔性互联,其中非隔离型BDDC的结构简单,造价低,不存在复杂的电磁干扰问题,更加适用于空间、成本受限的低压直流配电网^[10],故本文选取Buck型DC/DC变换器进行研究。

为了便于设计双向电压支撑控制策略,针对Buck型DC/DC变换器的模型需要考虑其两端口的电容动态特性,故本文所述Buck型DC/DC变换器的完整拓扑结构如附录A图A1所示。图中, L 为变换器的滤波电感; C_1 、 C_2 为两端口稳压电容; i 为电感电流; i_s 、 i_o 分别为流经开关管、二极管的电流; v_1 、 v_2 和 i_1 、 i_2 分别为两端口输入电压和电流; i_{C_1} 和 i_{C_2} 分别为流经 C_1 和 C_2 的电流; P_1 和 P_2 为两端口注入功率; P_t 为变换器的传输功率; P_{C_1} 和 P_{C_2} 分别为端口电容

C_1 和 C_2 的注入功率,功率流动方向如图中箭头方向所示。

忽略开关频率分量及其边频带,建立Buck型DC/DC变换器的开关周期平均模型,如式(1)所示。

$$\begin{cases} L \frac{d\langle i(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle v_1(t) \rangle_{T_s} d(t) - \langle v_2(t) \rangle_{T_s} \\ C_1 \frac{d\langle v_1(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle i_1(t) \rangle_{T_s} - \langle i(t) \rangle_{T_s} d(t) \\ C_2 \frac{d\langle v_2(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle i(t) \rangle_{T_s} - \langle i_2(t) \rangle_{T_s} d(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\langle v_1(t) \rangle_{T_s}$ 、 $\langle v_2(t) \rangle_{T_s}$ 、 $\langle i_1(t) \rangle_{T_s}$ 、 $\langle i_2(t) \rangle_{T_s}$ 、 $\langle i(t) \rangle_{T_s}$ 为相关变量在开关周期 T_s 内的平均值; $d(t)$ 为 t 时刻的占空比。

对于左侧端口而言,由功率平衡可得:

$$P_{C_1} = P_1 - P_t \quad (2)$$

由电容能量计算公式,对功率流动方程进行小信号处理,可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} s C_1 \Delta v_1^2 = \Delta P_1 - \Delta P_t \\ \frac{1}{2} s C_2 \Delta v_2^2 = \Delta P_2 + \Delta P_t \end{cases} \quad (3)$$

视两端口输入、输出电压均为理想电压,且忽略扰动,则有:

$$\Delta P_t = \frac{v_1^2}{sL} \Delta d \quad (4)$$

同理,可得:

$$\begin{cases} \Delta v_1^2 = -\frac{2\Delta P_t}{sC_1} \\ \Delta v_2^2 = \frac{2\Delta P_t}{sC_2} \end{cases} \quad (5)$$

推导可得 Δd 到 Δv_1^2 与 Δv_2^2 的传递方程为:

$$\begin{cases} \Delta v_1^2 = \frac{-2v_1^2}{s^2 C_1 L} \Delta d \\ \Delta v_2^2 = \frac{2v_2^2}{s^2 C_2 L} \Delta d \end{cases} \quad (6)$$

进一步化简可得:

$$\Delta v_1^2 - \Delta v_2^2 = \left(-\frac{2v_1^2}{s^2 C_1 L} - \frac{2v_2^2}{s^2 C_2 L} \right) \Delta d \quad (7)$$

其中, Δ 表示相关变量的小信号分量。

由式(7)可知,将 Δv_1 与 Δv_2 视为扰动输入,可构建二者平方差到 Δd 的传递函数,则可采用如图2所示的PI控制器对连接DCB _{m} 与DCB _{j} 的BDDC进行控制。

上述PI控制器对BDDC两侧母线电压进行归一

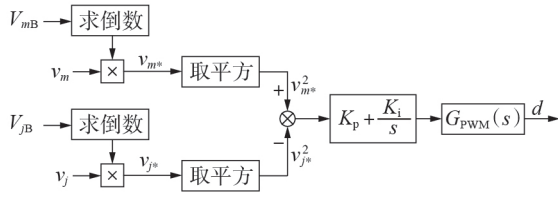


图2 Buck DC/DC变换器的双向电压支撑控制框图

Fig.2 Block diagram of bidirectional voltage support control for Buck DC/DC converter

化处理,得到归一化电压 v_{m*} 、 v_{j*} 如式(8)所示。

$$\begin{cases} v_{m*} = \frac{v_m}{V_{mB}} \\ v_{j*} = \frac{v_j}{V_{jB}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, v_m 、 v_j 和 V_{mB} 、 V_{jB} 分别为BDDC两侧DCB_m、DCB_j的实际电压和额定电压。该控制器可在稳态时实现变换器两侧母线电压在归一化视角下相等,其只需要 v_{m*}^2 与 v_{j*}^2 的差值作为反馈量输入,即仅需基于变换器的本地信息就可实现,是一个完全分散式的控制方法,其控制律可表示为:

$$d = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (v_{m*}^2 - v_{j*}^2) G_{PWM}(s) \quad (9)$$

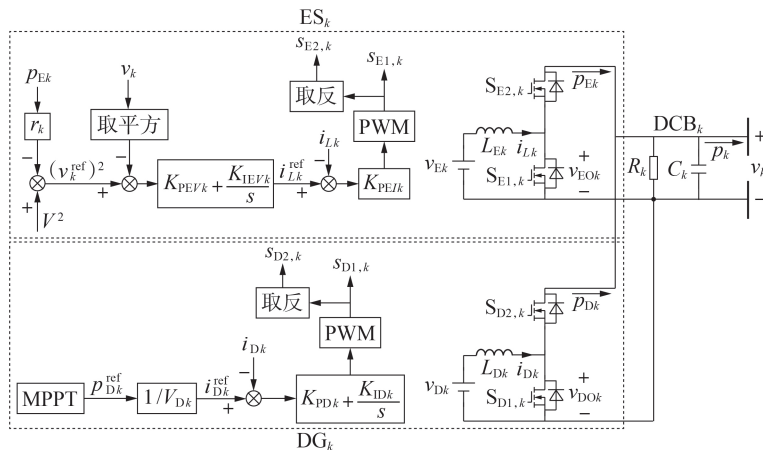
其中, $G_{PWM}(s)$ 为脉宽调制(PWM)的传递函数; K_p 、 K_i 分别为PI控制器的比例系数、积分系数。

子网系统 k (SBS_k)的内部详细结构及其控制框图如图3所示。储能ES_k通过Boost双向变换器与母线相连,并采用功率-电压平方下垂控制对母线电压进行支撑^[15];分布式电源DG_k为光伏或风机,同样通过Boost双向变换器接入母线,默认工作在最大功率点跟踪(MPPT)模式^[16],在短时间尺度内可认为其输出功率不变,将其等效为恒功率源进行分析;直流负荷L_k直接连接至母线运行。图中, p_k 为SBS_k的输出功率; V 为直流母线的额定电压; p_{Ek} 为ES_k的实际输出功率; r_k 为ES_k的下垂控制系数; v_k^{ref} 为ES_k下垂控制

的输出参考电压; K_{PEV_k} 、 K_{IEV_k} 分别为ES_k双环控制电压环路PI控制器的比例系数、积分系数; L_{Ek} 为ES_k的滤波电感; i_{Lk} 为ES_k的电感电流; i_{Lk}^{ref} 为ES_k电压环路的输出参考电流; K_{PEIk} 为ES_k电流环路比例控制器的比例系数; v_{Ek} 为ES_k的电池电压; v_{EOk} 为ES_k变换器开关管的实际输出电压,其参考输出电压为 v_{EOk}^{ref} ; $s_{E1,k}$ 、 $s_{E2,k}$ 分别为ES_k变换器开关管 $S_{E1,k}$ 、 $S_{E2,k}$ 的驱动信号; p_{Dk} 、 p_{Dk}^{ref} 分别为DG_k的MPPT控制输出的实际功率、参考功率; v_{Dk} 、 V_{Dk} 分别为DG_k的实际输出电压、额定输出电压; i_{Dk} 、 i_{Dk}^{ref} 分别为DG_k的实际输出电流、输出参考电流; K_{PDk} 、 K_{IDk} 分别为DG_k电流控制环路的比例系数、积分系数; L_{Dk} 为DG_k的输出滤波电感; v_{DOk} 为DG_k变换器开关管的实际输出电压,其参考输出电压为 v_{DOk}^{ref} ; $s_{D1,k}$ 、 $s_{D2,k}$ 分别为DG_k变换器开关管 $S_{D1,k}$ 、 $S_{D2,k}$ 的驱动信号; R_k 为连接到DCB_k的直流负荷等效电阻; C_k 为滤波电容。

在实际运行过程中,直流配电网的子网系统结构往往比图3更加复杂,可能包含多个储能、并入多台分布式电源以及为多个负荷供电。为了便于分析不同子网系统间、子网系统与BDDC间的交互影响,可对同类型设备进行等效。以SBS_k为例,多个储能组成的储能系统采用下垂控制,储能间通过下垂系数实现功率分担,可被整体视为具有等效下垂系数 r_k 的ES_k;子网系统中的分布式电源均采用功率控制,对外可等效为单台分布式电源DG_k,其输出功率为子网系统中所有分布式电源功率之和;除了常规的直流负荷外,通过变流器接入的有源负荷通常呈现恒功率负荷(CPL)特性,会影响系统的稳定运行^[17],分布式电源DG_k采用Boost双向变换器连接后,在功率控制模式下吸收恒定功率,可以近似模拟恒功率负荷特性。

基于上述子网系统的拓扑及相应的简化条件,SBS_k的动态特性可以表示为式(10)。

图3 SBS_k的结构及其控制框图Fig.3 Structure and control block diagram of SBS_k

$$\begin{cases}
L_{Ek} di_{Lk}/dt = v_{Ek} - v_{EOk} \\
p_{Ek} = v_{Ek} i_{Lk} \\
p_{Ek} + p_{Dk} - v_k^2/R_k = p_k \\
(v_k^{\text{ref}})^2 = v_k^2 - r_k p_{Ek} \\
i_{Lk}^{\text{ref}} = (K_{PEVk} + K_{IEVk}/s) [(v_k^{\text{ref}})^2 - v_k^2] \\
-v_{EOk}^{\text{ref}} = K_{PELk} (i_{Lk}^{\text{ref}} - i_{Lk}) \\
L_{Dk} di_{Dk}/dt = v_{Dk} - v_{DOk} \\
p_{Dk} = v_{Dk} i_{Dk} \\
i_{Dk}^{\text{ref}} = p_{Dk}^{\text{ref}}/v_{Dk} \\
-v_{DOk}^{\text{ref}} = (K_{PDk} + K_{IDk}/s) (i_{Dk}^{\text{ref}} - i_{Dk})
\end{cases} \quad (10)$$

综上所述,系统整体的分散式一次控制方法结构如图4所示。储能系统采用功率-电压平方下垂控制建立母线电压,分担功率波动;分布式电源采用功率控制为系统注入功率;BDDC采用分散式双向电压支撑控制使得经归一化处理后的互联母线电压相等。

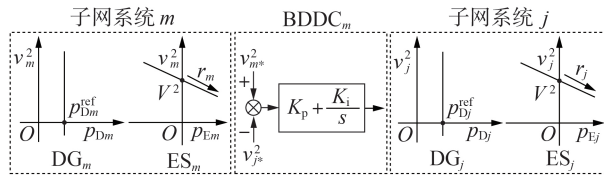


图4 多电压等级直流配电网的分散式一次控制方法

Fig.4 Decentralized primary control method of multi-voltage level DC distribution network

3 稳态分析与小信号稳定性分析

3.1 稳态分析

基于辐射状多电压等级直流配电网结构,对所提双向电压支撑控制方法的稳定性进行理论分析,利用连通图的形式对研究所用配电网拓扑结构进行表示,如图5所示。图中, N 条直流母线和系统接地点对应图的节点,分别记为 $n_k (k=1, 2, \dots, N)$ 和 n_0 ; BDDC与子网系统对应图的支路,并进一步对支路进行划分,所有BDDC和SBS_N构成树支,分别记为 $t_g (g=1, 2, \dots, N-1)$ 和 t_N ,剩余子网系统构成连支,记为 $l_k (k=1, 2, \dots, N-1)$ 。

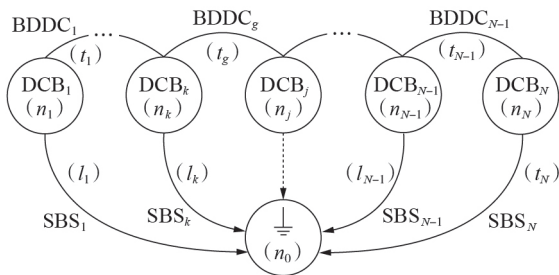


图5 基于连通图的多电压等级直流配电网拓扑

Fig.5 Topology of multi-voltage level DC distribution network based on connected graph

依据图论,可以构建包含 l_k, t_g, t_N 这3条支路的回路,该回路包含唯一的连支 l_k 和部分BDDC组成的树支,经归一化处理之后,支路稳态电压存在如下关系:

$$\begin{cases}
v_{t_g} = v_{k^*} - v_{j^*} & k=1, 2, \dots, N-1; j=2, 3, \dots, N \\
v_{t_N} = v_{N^*} \\
v_{l_k} = v_{k^*} & k=1, 2, \dots, N-1
\end{cases} \quad (11)$$

其中, v_{t_g}, v_{t_N} 和 v_{l_k} 分别为树支 t_g, t_N 和连支 l_k 经归一化处理后的电压。

由双向电压支撑控制策略可知,稳态时电压满足:

$$v_{k^*}^2 - v_{j^*}^2 = 0 \quad (12)$$

Buck型DC/DC变换器的拓扑保证两端口电压 $v_{g^*} \geq 0$ 与 $v_{j^*} \geq 0$ 成立,则在所提控制方法的作用下 $v_{t_g} = v_{k^*} - v_{j^*} = 0$ 恒成立。对于连支 l_k 与树支 t_N 而言,由基尔霍夫电压定律可知 $-V_{l_k} + V_{t_N} = 0$,结合式(11)可知 $v_{k^*} = v_{N^*} (k=1, 2, \dots, N-1)$ 成立,即在本文所提分散式双向电压支撑控制方法的作用下,可控制各直流母线电压的归一化数值相等。

3.2 小信号稳定性分析

将多电压等级直流配电系统并入中压直流配电网时,系统整体的稳定性主要依赖于电网支撑,故本节重点分析孤岛运行情况,以含有3个配电子网的多电压等级直流配电网系统为例进行分析,具体拓扑结构、电路参数和控制参数分别见附录A图A2、表A1和表A2。

在短时间尺度内,忽略母线电压波动,近似认为

$v_{EOk}^{\text{ref}} = v_{EOk}, v_{DOk}^{\text{ref}} = v_{DOk}$,则式(10)可简化为:

$$\begin{cases}
v_k^2 = V^2 - r_k p_{Ek} \\
p_{Ek} = p_k + \frac{v_k^2}{R_k} - p_{Dk} \\
p_{Dk} = p_{Dk}^{\text{ref}} \\
\Delta p_k = \Delta p_{Ek} + \Delta p_{Dk} - \frac{\Delta v_k^2}{R_k} \\
\Delta p_{Ek} = G_{p_{Ek}, v_k^2}(s) \Delta v_k^2 \\
\Delta p_{Dk} = G_{p_{Dk}, p_{Dk}^{\text{ref}}}(s) \Delta p_{Dk}^{\text{ref}}
\end{cases} \quad (13)$$

$$G_{p_{Ek}, v_k^2}(s) = \frac{-v_{Ek} K_{PELk} (s K_{PEVk} + K_{IEVk})}{K_{IEVk} K_{PEVk} v_{Ek} r_k + (K_{PEVk} v_{Ek} r_k + 1) K_{PELk} s + L_{Ek} s^2} \quad (14)$$

$$G_{p_{Dk}, p_{Dk}^{\text{ref}}}(s) = \frac{s K_{PDk} + K_{IDk}}{s^2 L_{Dk} + s K_{PDk} + K_{IDk}} \quad (15)$$

考虑3个配电子网的内部功率传递关系,结合式(9)、(10)、(13),可得:

$$\begin{cases}
\frac{C_{1,2}s\Delta v_1^2}{2} = G_{p_{E1},v_1}(s)\Delta v_1^2 - \frac{\Delta v_1^2}{R_1} + \Delta p_{D1} - \Delta p_{12} \\
\frac{C_{2,1}s\Delta v_2^2}{2} = G_{p_{E2},v_2}(s)\Delta v_2^2 - \frac{\Delta v_2^2}{R_2} + \Delta p_{D2} + \Delta p_{12} - \Delta p_{23} \\
\frac{C_{3,2}s\Delta v_3^2}{2} = G_{p_{E3},v_3}(s)\Delta v_3^2 - \frac{\Delta v_3^2}{R_3} + \Delta p_{D3} + \Delta p_{23} \\
\Delta p_{12} = G_{p_{12},v^2}(s)(\Delta v_1^2 - \Delta v_2^2) \\
\Delta p_{23} = G_{p_{23},v^2}(s)(\Delta v_2^2 - \Delta v_3^2) \\
\Delta p_{Dk} = G_{p_{Dk},P_{Dk}^{ref}}(s)\Delta p_{Dk}^{ref} \quad k=1,2,3 \\
G_{p_{ij},v^2}(s) = \frac{v_i v_j (K_p + K_i/s)(v_i^2 - v_j^2)G_{PWM}(s)}{sL(C_{ij} + C_{j,i})}
\end{cases} \quad (16)$$

其中, Δp_{kj} 为 SBS_k 输入 BDDC_j 的功率小信号分量。

进一步定义系统状态变量 $\Delta v = [\Delta v_1^2, \Delta v_2^2, \Delta v_3^2]^T$, $\Delta p_D = [\Delta p_{D1}^{ref}, \Delta p_{D2}^{ref}, \Delta p_{D3}^{ref}]^T$, $\Delta p_C = [\Delta p_{12}, \Delta p_{23}]^T$, 整理可得矩阵形式方程为:

$$\begin{cases}
\Delta \dot{v} = A\Delta p_D + B\Delta p_C \\
\Delta p_C = C\Delta v
\end{cases} \quad (17)$$

其中, 矩阵 A 、 B 、 C 具体见附录 B 式(B1)。

基于上述小信号模型研究控制参数对系统稳定性的影响, 为了便于分析, 各配电子网采用相同的控制参数。当比例系数 K_p 由 0 增长至 10 时系统的根轨迹见图 6。由图可知, 随着 K_p 不断增大, 根轨迹逐渐远离虚轴, 系统的稳定性增加, 可见所采用的控制参数可以保证系统稳定。

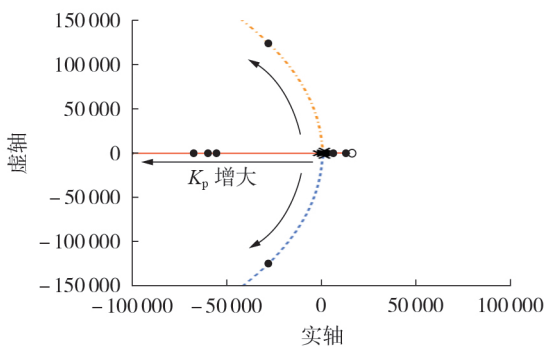


图6 比例系数变化时的系统根轨迹

Fig.6 Root locus of system with changed proportionality coefficient

4 系统仿真验证

4.1 系统仿真拓扑

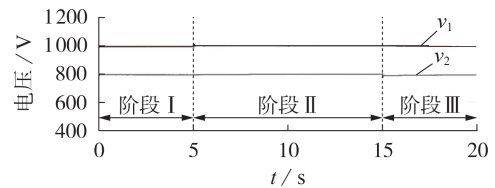
为了验证本文所提分散式双向电压支撑控制方法的有效性, 在 MATLAB / Simulink 中搭建了一个多电压等级直流配电网系统(拓扑结构见附录 A 图 A2), 整个系统包含 3 个配电子网, 子网 1 可接入中压直流配电网, 各子网均接入了储能、光伏发电单元与直流负荷, 其中各储能变换器均采用相同的控制

参数, 各分布式电源均采用 MPPT 控制。实验系统电路参数和控制参数分别见附录 A 表 A1 和表 A2。

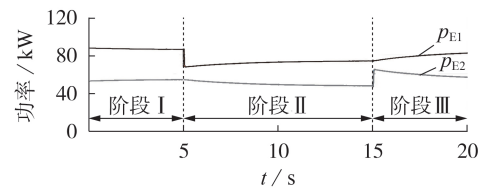
4.2 仿真结果分析

4.2.1 运行工况 1: 正常运行

在该运行工况下, 子网 1 与中压直流配电网断开, 子网 3 暂不接入, 子网 1 与子网 2 通过 BDDC₁ 相连并协同运行, 各子网的母线电压由各自的储能系统支撑, 初始运行阶段(阶段 I)的参数见附录 A 表 A1, 阶段 II 子网 1 中分布式电源出力增加 20 kW, 阶段 III 子网 2 中负荷增加 20 kW。运行工况 1 的仿真结果见图 7。



(a) 子网母线电压



(b) 储能输出功率

图7 运行工况 1 的仿真结果

Fig.7 Simulative results of operation condition 1

由图 7 可以看出, 当多电压等级直流配电网系统内部出现功率波动时, 各子网的母线电压仅产生小范围的波动, 之后迅速稳定至额定值附近, 在分布式电源出力增加时, 储能系统相应减少出力, 同时多余的功率通过 BDDC₁ 由子网 2 进一步分担, 储能系统不但可以响应所在子网内部的功率突变情况, 还可与相邻子网进行功率互动, 跨子网提供功率支撑。

4.2.2 运行工况 2: 部分储能退出运行

在该运行工况下, 子网 1 与中压直流配电网断开, 子网 3 暂不接入, 初始运行阶段(阶段 I)子网 1、2 正常运行, 阶段 II 原有支撑子网 2 母线电压的储能因故障退出运行, 子网 2 的母线电压由 BDDC₁ 建立。运行工况 2 的仿真结果见图 8。

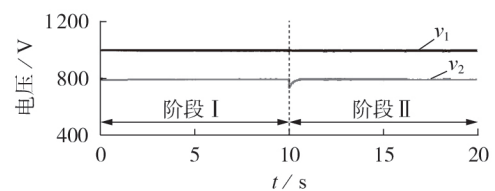


图8 运行工况 2 的仿真结果

Fig.8 Simulative results of operation condition 2

由图 8 可以看出, 子网 2 的储能退出运行后, 子网 2 的母线电压出现 30~40 V 的暂降, 在本文所提双

向电压支撑控制方法的作用下,子网1的储能通过BDDC₁为子网2提供电压支撑,故障发生后0.8 s,子网2的母线电压恢复至额定值附近。

进一步地,对多电压等级直流配电网系统接入中压配电网运行工况、拓展电压等级运行工况进行了仿真,具体结果见附录C。

5 结论

本文针对采用BDDC柔性互联的多电压等级直流配电网,提出了分散式双向电压支撑控制方法。首先,对多电压等级直流配电网的拓扑进行分析与建模,建立了考虑端口电容特性的子网互联BDDC和储能变换器的小信号模型,并基于所建模型提出了对应的分散式控制方法,其中子网互联BDDC采用分散式归一化电压平方差控制,储能变换器采用功率-电压平方下垂控制;然后,对所提控制方法的可行性进行了稳态分析,分析结果表明所提分散式归一化电压平方差控制可在稳态时将所有母线电压控制至相应的稳定运行区间内,进一步与储能变换器的功率-电压平方下垂控制相结合,可灵活应对部分储能退出运行、接入中压直流配电网、电压等级拓展等运行工况;最后,基于MATLAB/Simulink对所提控制方法进行仿真,验证了其有效性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李明节,于钊,许涛,等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术,2017,41(4):1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4):1035-1042.
- [2] 杜翼,江道灼,尹瑞,等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):139-145.
DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topology structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):139-145.
- [3] 梁永亮,吴跃斌,马钊,等. 新一代低压直流供用电系统在“新基建”中的应用技术分析与发展展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1):13-24, 394.
LIANG Yongliang, WU Yuebin, MA Zhao, et al. Application and development prospect of new generation of LVDC supply and utilization system in “New Infrastructure”[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1):13-24, 394.
- [4] 马钊,赵志刚,孙媛媛,等. 新一代低压直流供用电系统关键技术及发展展望[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):12-22.
MA Zhao, ZHAO Zhigang, SUN Yuanyuan, et al. Key technologies and development prospect of new generation low-voltage DC power supply and utilization system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23):12-22.
- [5] 彭克,陈佳佳,徐丙垠,等. 柔性直流配电系统稳定性及其控制关键问题[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):90-98, 115.
PENG Ke, CHEN Jiajia, XU Bingyin, et al. Key issues of stability and control in flexible DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23):90-98, 115.
- [6] 祁琪,姜齐荣,许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术,2020,44(12):4664-4676.

QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676.

- [7] 季一润,袁志昌,赵剑锋,等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(2):335-341.
JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2):335-341.
- [8] 李霞林,郭力,黄迪,等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术,2019,45(10):3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10):3039-3049.
- [9] 刘家赢,韩肖清,王磊,等. 直流微电网运行控制策略[J]. 电网技术,2014,38(9):2356-2362.
LIU Jiaying, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Operation and control strategy of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2356-2362.
- [10] GORJI S A, SAHEBI H G, EKTESABI M, et al. Topologies and control schemes of bidirectional DC-DC power converters: an overview[J]. IEEE Access, 2019, 7:117997-118019.
- [11] MIDDLEBROOK R D, CUK S. A general unified approach to modelling switching-converter power stages[C]//1976 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Cleveland, OH, USA: IEEE, 1976:18-34.
- [12] YANG P C, XIA Y H, YU M, et al. A decentralized coordination control method for parallel bidirectional power converters in a hybrid AC-DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8):6217-6228.
- [13] WANG L, ZHANG D L, WANG Y, et al. High-frequency solid-state transformer power conversion technologies for energy internet[C]//2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia). Kaohsiung, Taiwan, China: IEEE, 2017:1397-1401.
- [14] YANG P C, YU M, WU Q W, et al. Decentralized bidirectional voltage supporting control for multi-mode hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3):2615-2626.
- [15] XIA Y H, YU M, YANG P C, et al. Generation-storage coordination for islanded DC microgrids dominated by PV generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1):130-138.
- [16] DE BRITO M A G, GALOTTO L, SAMPAIO L P, et al. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3):1156-1167.
- [17] XU Q W, ZHANG C L, WEN C Y, et al. A novel composite nonlinear controller for stabilization of constant power load in DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):752-761.

作者简介:



司鑫尧

司鑫尧(1993—),男,山东济宁人,工程师,硕士,研究方向为直流配电网控制保护、配电网保护及故障自愈(E-mail: sixinyao@foxmail.com);

赵竞涵(1995—),男,河北保定人,博士研究生,主要研究方向为直流配电网运行控制(E-mail: zhaojinghan12@zju.edu.cn);

于森(1984—),男,河北保定人,副教授,博士,主要研究方向为智能电网与智能控制(E-mail: zjuyumiao@zju.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Decentralized bidirectional voltage support control method available for multi-voltage level DC distribution network

SI Xinyao¹, ZHAO Jinghan², YU Miao², LIU Haitao³, XIONG Xiong³, WEI Wei²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210003, China;

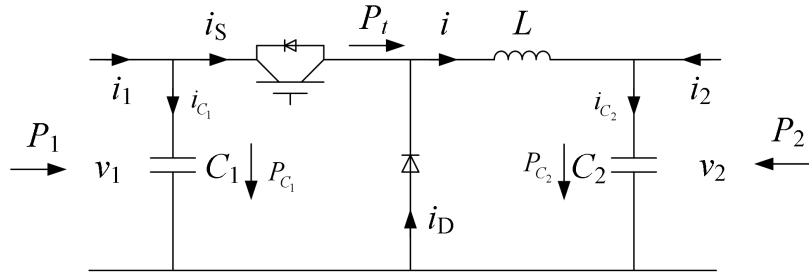
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The integration of new energy power generation, energy storage system and DC load to DC distribution network can reduce DC/AC conversion stage, simplify control and improve system operation efficiency. Therefore, DC distribution network has received widespread attention in recent years. Using power electronic devices to construct a multi-voltage level DC distribution network has more flexible topological structure, more variable operation forms and higher power supply reliability, but it also brings many challenges to the stable and efficient operation of distribution network. Aiming at the bidirectional DC/DC converter for sub-network interconnection in multi-voltage level DC distribution network, a decentralized normalized voltage square variance control method is proposed based on the two-terminal voltage of the converter. Combined with the power-voltage square droop control of energy storage converter, the control method can realize the equalization of bus voltage with different voltage levels under normalization perspective, provide uninterrupted voltage support for the bus of all voltage levels, and enable the system to switch flexibly among multiple operation modes, such as switching in and out of energy storage, expansion of voltage level, integration to medium voltage DC distribution network, and so on. The feasibility and stability of the proposed control method are analyzed, and its effectiveness is verified by simulation based on MATLAB/Simulink.

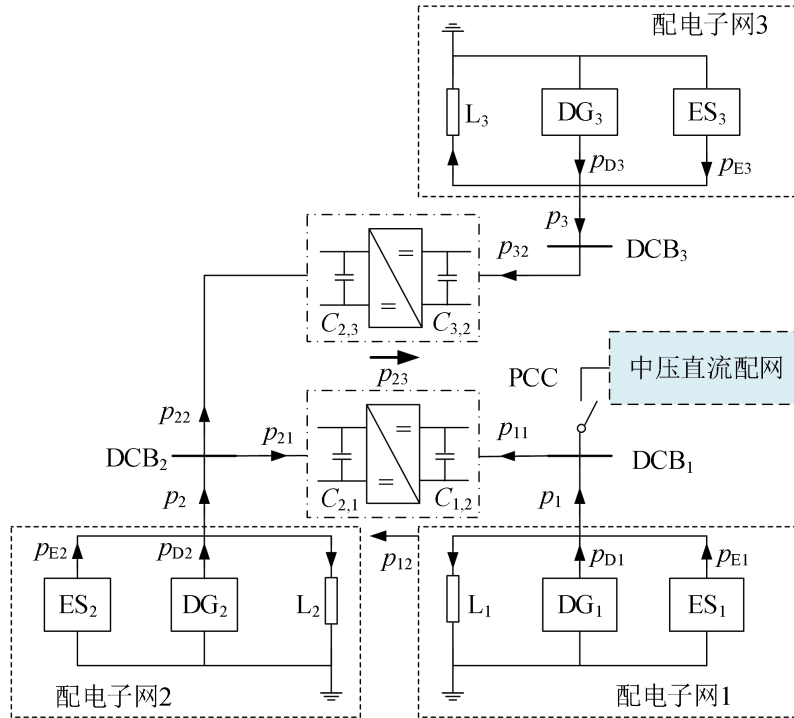
Key words: bidirectional DC/DC converter; decentralized control; voltage support; DC distribution network; multiple operation modes

附录 A



图A1 Buck型DC/DC变换器的拓扑结构

Fig.A1 Topology structure of Buck DC/DC converter



图A2 实验系统的拓扑结构

Fig.A2 Topology structure of of experiment system

表 A1 实验系统的电路参数

Table A1 Circuit parameters of experiment system

参数	子网 1	子网 2	子网 3
母线电压/V	1000	800	500
储能系统电压/V	600	600	600
分布式电源功率/kW	30	20	20
负荷功率/kW	10	50	25
等效线路电阻/ Ω	0.001	—	—
等效线路电感/mH	1.5	3	3

表 A2 实验系统的控制参数

Table A2 Control parameters of experiment system

参数	取值
BDDC ₁ 控制比例系数	1
BDDC ₁ 控制积分系数	100
BDDC ₂ 控制比例系数	1
BDDC ₂ 控制积分系数	100
储能变换器的下垂系数	0.8
储能变换器外环控制比例系数	0.0007
储能变换器外环控制积分系数	0.7
储能变换器内环控制比例系数	8

附录 B

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{A} = \text{diag}\left(G_{v_1^2, p_{D1}^{\text{ref}}}(s), G_{v_2^2, p_{D2}^{\text{ref}}}(s), G_{v_3^2, p_{D3}^{\text{ref}}}(s)\right) \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -G_{v_1^2, p_{D1}}(s) & 0 \\ G_{v_2^2, p_{D2}}(s) & -G_{v_2^2, p_{D2}}(s) \\ 0 & G_{v_3^2, p_{D3}}(s) \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} G_{p_{12}, v^2}(s) & -G_{p_{12}, v^2}(s) & 0 \\ 0 & G_{p_{23}, v^2}(s) & -G_{p_{23}, v^2}(s) \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{B1})$$

$$G_{v_k^2, p_{Dk}^{\text{ref}}}(s) = \frac{G_{p_{Dk}, p_{Dk}^{\text{ref}}}(s)}{\frac{C_k s}{2} - G_{p_{Ek}, v_k^2}(s) + R_k^{-1}} \quad k = 1, 2, 3 \quad (\text{B2})$$

附录 C

(1) 运行工况 3：接入中压配电网运行。

在这一运行工况下，运行阶段 I 子网 1 与中压直流配电网断开，子网 1、2 由储能系统提供电压支撑；运行阶段 II 子网 1、2 的储能系统退出运行，子网 1 接入中压直流配电网，由中压配电网为整个系统母线电压提供支撑。运行工况 3 的仿真结果见图 C1。

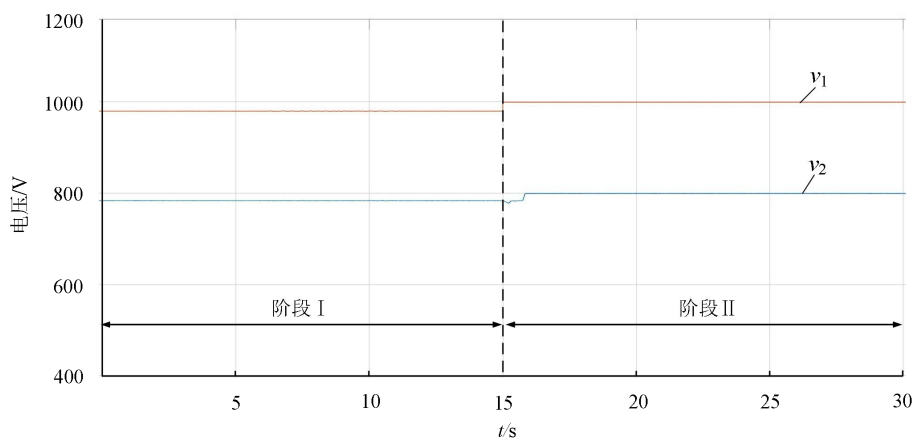


图 C1 运行工况 3 的仿真结果

Fig.C1 Simulative results of operation condition 3

由上图可以看出，接入中压配电网后，中压配电网可等效为工作在恒定电压模式下的储能系统，子网 1 母线电压迅速建立，之后在双向电压支撑控制方法的作用下，子网 2 母线电压通过 BDDC₁ 建立支撑，逐渐调整至额定值附近。

(2) 运行工况 4：电压等级扩展。

运行工况 4 用于验证所提双向电压支撑控制方法的拓展能力。在该工况的运行阶段 I，子网 1 与子网 2 通过 BDDC₁ 互联运行，子网 3 独立运行；在运行阶段 II，子网 3 通过 BDDC₂ 与子网 2 相连，直流配电网系统扩展至 3 个电压等级。运行工况 4 的仿真结果见图 C2。

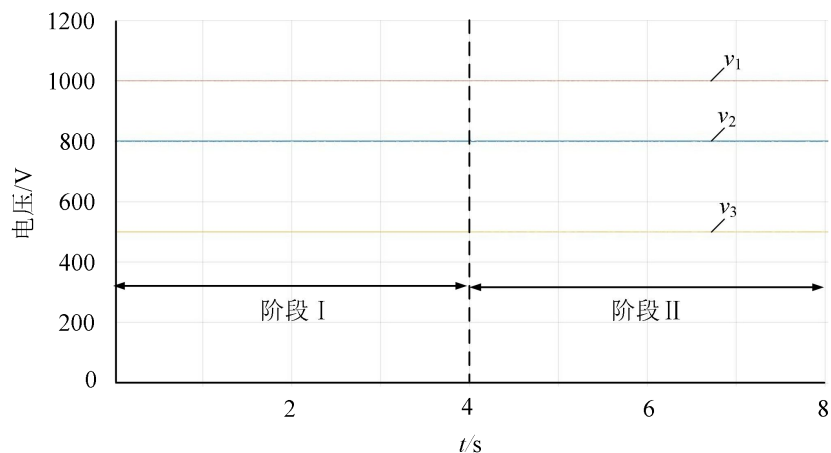


图 C2 运行工况 4 的仿真结果

Fig.C2 Simulative results of operation condition 4

由图可知，在所提控制方法的作用下，系统扩展后的各子网母线电压均稳定在额定电压附近，电压等级结构与控制方法未发生改变，表明所提控制方法具有良好的电压拓展能力。