

基于储能装置的自主直流电网系统分散控制与非线性稳定性分析

寇志豪, 曹建旗

(国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要: 直流配电系统和直流微电网因与大多数分布式能源、储能设备及负载的直流特性高度兼容, 成为新兴的替代能源解决方案。为应对传统直流系统中功率平衡和稳定性问题, 提出了一种基于储能装置的自主直流电网系统的分散控制策略及其非线性稳定性分析方法。首先, 构建了一个包含多种直流分布式能源、并联电池支路和可变直流负载的非线性直流电网模型, 探讨了在电子电源接口上应用简单分散式控制器的实现路径; 其次, 设计了完全独立于系统参数的级联控制器方案, 并纳入系统模型进行全面的非线性稳定性分析; 然后, 通过应用先进的李雅普诺夫方法, 对整个非线性系统进行严格的稳定性和收敛性分析, 该方法无需依赖具体系统特性, 确保系统的稳定运行; 最后, 通过案例仿真验证, 证明了所提方案在实现系统稳定性和功率平衡方面的有效性。

关键词: 直流配电系统; 直流微型电网; 稳定性分析; 下垂控制; 直流/直流转换器; 李雅普诺夫 (Lyapunov) 方法

中图分类号: TM 933 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)06-0028-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240604

Decentralized Control and Nonlinear Stability Analysis of Autonomous DC Grid Systems with Energy Storage Devices

KOU Zhihao, CAO Jianqi

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: DC distribution systems and DC microgrids are gaining increasing attention as emerging alternative energy solutions due to their compatibility with DC characteristics of most distributed energy resources, storage devices and loads. To address the challenges of power balance and stability in traditional DC systems, a decentralized control strategy and nonlinear stability analysis method for autonomous DC grid systems with energy storage devices is proposed. Firstly, a nonlinear DC grid model is constructed, including various DC distributed energy resources, parallel battery branches and variable DC loads, which explores the implementation path of simple decentralized controllers on electronic power interfaces. Secondly, a cascaded controller scheme is designed, which is completely independent from system parameters and incorporated into system model for comprehensive nonlinear stability analysis. And then, by applying advanced Lyapunov method, a rigorous analysis of stability and convergence of the entire nonlinear system is conducted without relying on specific system characteristics, which ensures the stable operation of system. Finally, through the detailed simulations, the effectiveness of the proposed scheme in achieving system stability and power balance is demonstrated.

Key words: DC distribution systems; DC microgrids; stability analysis; droop control; DC/DC converter; Lyapunov method

0 引言

为了应对环境问题减少二氧化碳排放, 电力系统可再生能源的渗透率逐渐提升。风能和光伏发电

等可再生能源有效地提供了大部分清洁电力, 电动汽车 (electric vehicle, EV) 等也发挥着关键作用^[1]。由于许多分布式能源 (distributed energy resources, DER) 是直流设备, 加之直流负载的增加, 直流配电系统和直流微电网成为可行选择。与交流配电相

比,直流配电具有效率、可靠性和经济性优势,因为它消除了中间的 DC/AC/DC 转换阶段^[2]。

然而,直流配电系统和直流微电网的部署面临的一个关键挑战是系统稳定性,这主要是由于大多数 DER 具有随机性和间歇性,而负载变化也有不确定性。与交流电力系统相比,直流电网的稳定性尚未得到充分研究。文献[3]通过将设备视为独立组件,分析由 DC/DC 转换器引起的不稳定性,并通过设计合适的输入滤波器^[4]或应用阻抗和劳斯-赫尔维茨判据确定其稳定区域^[5-6]。然而,仅靠为单个变流器设计合适的控制器方案,并不足以确保由集成变流器主导的配电系统在稳定区域内运行^[7-8]。

为了解决上述问题,有学者提出在微电网中为每个电力电子器件添加下垂控制方案,但微电网系统中各个控制器的独立调节仍可能导致系统不稳定^[9]。在直流配电网中,下垂控制器根据下垂系数提供与输出功率成反比的电压校正^[10]。下垂控制器的目标是生成电压参考信号以补偿预定功率与负载需求之间的瞬时失配。下垂系数对系统稳定性和均流精度有显著影响:较高的下垂系数通常提高系统阻尼和均流精度,但须权衡以保持电压偏差在可接受范围内。通常,假设下垂控制比外环电压控制和内环电流控制慢,忽略快速动态并使用小信号分析可以保障直流电网的稳定^[10]。然而,这种基于特征值的分析依赖于特定系统参数^[11-13],因而并不通用。此外,尽管一些研究将所有 DER 和负载视为一阶系统,但实际上很大一部分直流负载应建模为恒定阻抗负载^[14-16]。此外,小信号稳定性分析还被应用于舰船和飞机的电网系统^[17-19]。

同时,未来电动汽车的广泛普及是推动直流配电系统和微电网设计的主要动力之一。除了在非高峰时段充电以实现低成本的长期管理策略外,短期内的解决方案也在积极探索中。目前,工业界已提出快速或超快速直流充电基础设施,以实现电池在最短时间内安全充电,并将其充至 80% 标称荷电状态 (state of charge, SOC) 的时间缩短至 10 min 以内^[20]。这种需求推动了在城市中部署能够满足电力需求的直流电网。当电池作为存储设备时,该方案用于调节存储设备的功率共享和 SOC 速率^[21-22]。

综上,在以往的研究分析中,快速初级内环控制器的动态常被忽略^[23]。然而,下垂控制驱动系统的小信号稳定性,是在假设内环控制能使实际输出收

敛至其参考值的基础上进行的,故需要更稳健的设计并对系统稳定性进行分析,包括快速控制器的动态特性。因此,为了探讨自主直流微电网系统中实时功率平衡的问题,下面建立了一个包含直流配电系统所有特定动态及内环控制器动态特性的模型,并基于此提出了一种级联控制方案,可有效地实现功率平衡和电池充电共享。

1 系统模型

为了对系统的稳定性进行分析,设计了一个处于独立运行模式的直流微电网系统的精确模型,包括内环和外环电流以及电压级联控制器,如图 1 所示。该模型包括多个 DER、恒功率负载和纯电阻负载组成的可变负载以及两个电池充电支路。

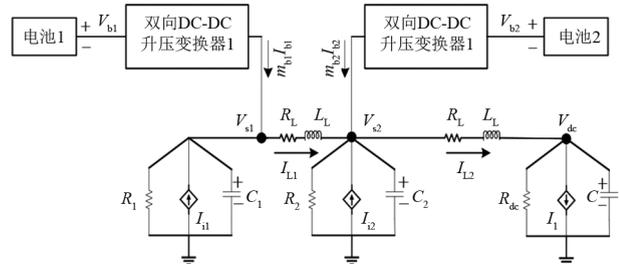


图 1 直流配电系统的结构

DER 被视为电流源,其运行水平由当前的注入功率决定,例如运行在其最大功率点的光伏发电机,这些发电机可被表示为可变电流源,而储能装置则被建模为锂离子电池^[23]。当恒功率负载连接至 DER 母线时,电流源实际代表了净功率源,其值是在减去吸收的恒定负电流后确定的。

两个电池支路分别表示快速充电和慢速充电支路,其动态模型详细描述了每个 DC/DC 转换器接口的占空比输入如何控制直流电网。电池通过双向升压变换器作为电力接口与系统连接,如图 2 所示。

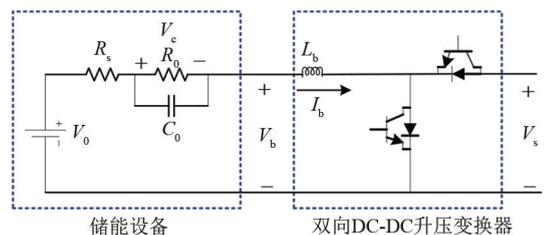


图 2 电池与双向 DC/DC 升压变换器支路模型

直流电阻负载由两部分组成:1 个恒定功率负载与 1 个纯电阻负载,这两者并联后通过配电线连

接到公共节点。直流电阻负载组件可以在运行期间动态变化,而恒功率负载部分被视为从直流配电系统中吸收能量的恒流源。这种负载建模方法适用于所有通过 DC/DC 或 DC/AC 转换器连接的负载,且在现代配电系统中,这类负载占据了相当大的比例。由于系统要求电压偏差不得超过严格的限制,因此将这些负载建模为吸收能量的恒流源是合适的。

系统中的变换器均采用平均值模型。因此,系统中其他电感电容元件的动态方程分别为:

$$L_b \frac{dI_{b1}}{dt} = -R_s I_{b1} - V_{c1} - m_{b1} V_{s1} + V_{o1} \quad (1)$$

$$L_b \frac{dI_{b2}}{dt} = -R_s I_{b2} - V_{c2} - m_{b2} V_{s2} + V_{o2} \quad (2)$$

$$C_o \frac{dV_{c1}}{dt} = V_{c1}/R_{o1} + I_{b1} \quad (3)$$

$$C_o \frac{dV_{c2}}{dt} = -V_{c2}/R_{o2} + I_{b2} \quad (4)$$

$$C_1 \frac{dV_{s1}}{dt} = x_1 I_{i1} + m_{b1} I_{b1} - I_{L1} - V_{s1}/R_1 \quad (5)$$

$$L_L \frac{dI_{L1}}{dt} = -R_L I_{L1} + V_{s1} - V_{s2} \quad (6)$$

$$C_2 \frac{dV_{s2}}{dt} = x_2 I_{i2} + m_{b2} I_{b2} + I_{L1} - I_{L2} - V_{s2}/R_2 \quad (7)$$

$$L_2 \frac{dI_{L2}}{dt} = -R_L I_{L2} + V_{s2} - V_{dc} \quad (8)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -V_{dc}/R_{dc} + I_{L2} + I_1 \quad (9)$$

式中: I_{b1} 、 I_{b2} 为电池 1、电池 2 的电流; V_{c1} 、 V_{c2} 分别为电阻 R_{o1} 、 R_{o2} 上的电压; V_{o1} 、 V_{o2} 为电池 1、电池 2 的初始电压水平值; R_s 为储能设备的电阻,取决于电池的类型; V_{s1} 、 V_{s2} 为多段直流源连接点的电压; R_1 、 R_2 为局部电阻性负载; I_{L1} 、 I_{L2} 为电流源 1、电流源 2 的最大电流水平; x_1 、 x_2 为电流系数,取值范围为 0~1,表示考虑局部恒功率负荷后电流源的运行情况; m_{b1} 和 m_{b2} 分别为变换器 1、变换器 2 的占空比信号,它们代表系统的受控输入; R_L 、 L_L 为连接线参数; V_{dc} 为负载母线电压等级; R_{dc} 为直流侧的电阻; I_1 为恒电流源的电流值。

2 所提控制方案

基于所建自主直流微电网系统提出了一种级联

控制方案,将简单的电流控制器和基于功率/电压下垂控制的控制器分别作为快速内环控制器和较慢的外环控制器。该方案基于时间尺度分离原理,按照一种广泛应用的级联模式设计。时间尺度分离原理允许实现级联控制器,其中内环为 PI 快速电流控制器,用于将双向升压变换器的电流调节至参考值,而参考值由一对慢速外环 PI 控制器生成。所建自主直流微电网系统中,电动汽车的充放电线路可以作为一个储能系统,在系统中唯一负责功率平衡,从而允许其他 DER 在任何预定的功率水平下正常运行。同时,储能设备之间的功率共享是依据下垂控制特性来实现的。通过为快速充电支路采用 5 倍于慢速充电支路的下垂系数,实现了两者之间的 5:1 功率平衡,从而达到了第一个支路 5 倍的 SOC 提升速度。

所提控制方案如图 3 所示:首先,将测得的直流电压 V_{dc} 与负载母线标称直流电压参考值 V_{dc}^{nom} 进行比较;然后,将比较结果作为输入信号传递到两个控制路径,分别对应每个储能单元分支的控制输入,即 n_{b1} 和 n_{b2} ,控制每个 DC/DC 升压变换器。在每个路径中,基于下垂控制的命令输入被修正后,传递至较慢的外环控制器,最终生成内环快速电流控制器的参考命令输入。

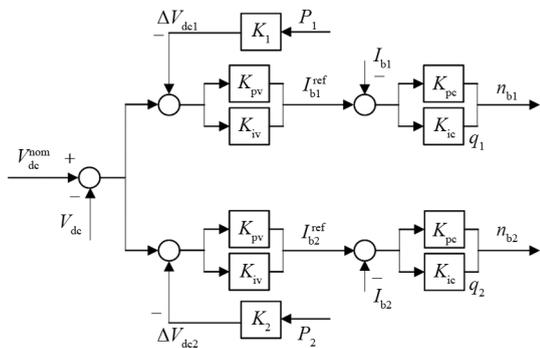


图 3 基于下垂的级联控制方法

为了将当前的内环控制器整合到系统中,并确保每个变换器电流 I_{b1} 和 I_{b2} 稳定收敛至其平衡点,需要在控制回路中激活一对相应的积分器。由于 n_{b1} 和 n_{b2} 分别代表每个变换器的占空比输入,因此可以分别从式 (10) 和式 (11) 中得到。

$$n_{b1} = K_{pc} (I_{b1}^{ref} - I_{b1}) + \frac{K_{ic}}{s} (I_{b1}^{ref} - I_{b1}) \quad (10)$$

$$n_{b2} = K_{pc} (I_{b2}^{ref} - I_{b2}) + \frac{K_{ic}}{s} (I_{b2}^{ref} - I_{b2}) \quad (11)$$

式中: K_{pc} 、 K_{ic} 分别为比例和积分电流控制器增益的

正标量; I_{b1}^{ref} 、 I_{b2}^{ref} 分别为两个电流控制内环的参考值,由外环电压控制确定。

为进一步提升控制器性能,提出了一个加入阻尼项的比例积分方案,将图3中电流控制内环积分器的状态 q_1 和 q_2 做如下修改:

$$\frac{dq_1}{dt} = I_{b1}^{\text{ref}} - I_{b1} - K_{\Pi 1} q_1 \quad (12)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = I_{b2}^{\text{ref}} - I_{b2} - K_{\Pi 2} q_2 \quad (13)$$

式(12)和式(13)中的最后一项被额外插入以引入积分器阻尼,其中阻尼系数 $K_{\Pi 1}$ 和 $K_{\Pi 2}$ 是非常小的正标量。因此,修改后的电流内环控制器为:

$$n_{b1} = K_{\text{pc}}(I_{b1}^{\text{ref}} - I_{b1}) + K_{\text{ic}} q_1 \quad (14)$$

$$n_{b2} = K_{\text{pc}}(I_{b2}^{\text{ref}} - I_{b2}) + K_{\text{ic}} q_2 \quad (15)$$

根据前面的假设和完整控制方案设计的级联结构,电压控制外环的输出为:

$$I_{b1}^{\text{ref}} = -K_{\text{pv}}(V_{\text{dc}} - V_{\text{dc}}^{\text{nom}} + \Delta V_{\text{dc}1}) - \frac{K_{\text{iv}}}{s}(V_{\text{dc}} - V_{\text{dc}}^{\text{nom}} + \Delta V_{\text{dc}1}) \quad (16)$$

$$I_{b2}^{\text{ref}} = -K_{\text{pv}}(V_{\text{dc}} - V_{\text{dc}}^{\text{nom}} + \Delta V_{\text{dc}2}) - \frac{K_{\text{iv}}}{s}(V_{\text{dc}} - V_{\text{dc}}^{\text{nom}} + \Delta V_{\text{dc}2}) \quad (17)$$

其中:

$$\Delta V_{\text{dc}1} = -K_1 V_{s1} n_{b1} I_{b1} \quad (18)$$

$$\Delta V_{\text{dc}2} = -K_2 V_{s2} n_{b2} I_{b2} \quad (19)$$

式中: K_{pv} 、 K_{iv} 分别为电压控制器的比例和积分系数; K_1 、 K_2 为下垂系数。

3 非线性闭环系统的稳定性分析

为了对整个闭环系统进行稳定性分析,将特定的直流微电网/快速内环控制器模型以合适的、更一般的非线性形式表示为

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + Bu \quad (20)$$

式中: x 为系统闭环模型的状态变量; B 为系统的控制矩阵; u 为外部输入向量,被认为是一个恒定的或分段的恒定扰动,它由电池内部电压、DER 和恒定功率负载电流源以及电池电流的命令获得。

由于所使用的精确模型是非线性的,为证明系统的稳定性和收敛性,采用李雅普诺夫函数进行分

析。与线性化和特征值研究等其他方法相比,李雅普诺夫函数具有显著优势,因为它可以直接应用于非线性系统,并且允许独立于特定系统参数和特征值的全局结论。尽管如此,李雅普诺夫函数通常在操作(平衡)点为0时最为有效。然而,在所述案例中,操作点显然不是0,因此需要更复杂的分析技术。

在这个框架中,分析的基本概念是证明式(20)的系统是有界输入有界输出稳定的,即相对于不受控制的输入 u 是稳定的,并且当这些输入取恒定值时,系统状态会收敛到一个存在的平衡点。完整的稳定性证明可参考文献[24-25]。

首先,选择合适的李雅普诺夫函数 H 候选者为

$$H = L_b(I_{b1}^2 + I_{b2}^2) + C_0(V_{c1}^2 + V_{c2}^2) + \frac{1}{2}C_1 V_{s1}^2 + \frac{1}{2}C_2 V_{s2}^2 + \frac{1}{2}L_L(I_{L1}^2 + I_{L2}^2) + \frac{1}{2}C V_{\text{dc}}^2 + \frac{1}{2}K_{\text{ic}}(q_1^2 + q_2^2) \quad (21)$$

然后,对 H 取时间导数代入所有状态函数的导数式并经代数处理后, H 计算为

$$\frac{dH}{dt} = -x^T R x + y^T u \quad (22)$$

$$y = Cx \quad (23)$$

式中: R 为系统变量的向量总和; y 为系统输出向量; C 为系统控制矩阵的转置,即 $C = B^T$ 。

由式(22)可得式(24)。

$$\frac{dH}{dt} \leq -\lambda_{\min}\{R\} \|x\|^2 + \|x\|^2 \|C^T u\| \quad (24)$$

式中, λ_{\min} 为 R 的最小特征值。

定义一个正标量 $0 < \theta < 1$,使得 $-\lambda_{\min}\{R\} \|x\|^2$ 支配 $\|x\|^2 \|C^T u\|$,则有

$$\frac{dH}{dt} \leq -(1 - \theta)\lambda_{\min}\{R\} \|x\|^2 - \theta\lambda_{\min}\{R\} \|x\|^2 + \|x\|^2 \|C^T u\| \quad (25)$$

同时,假设 $\|C^T u\| = \|u\|$,因此,可得

$$\frac{dH}{dt} \leq -(1 - \theta)\lambda_{\min}\{R\} \|x\|^2, \forall \|x\| \geq \frac{\|u\|}{\theta\lambda_{\min}\{R\}} \quad (26)$$

此时,式(20)定义的系统相对于外部输入 u 为状态稳定。对包含内环电流控制器的精确非线性系统模型进行的稳定性分析,确保了系统在任何基于下垂的外环控制器生成的有界外部命令输入,都能够保持在稳定区域。由于系统在瞬态后会收敛到由

恒定外部命令输入集确定的新平衡点,因此无须寻找难以准确界定的稳定区域。下一章将进一步验证这一点。

4 案例研究

所有算例均在 Matlab 仿真软件中通过编程和构建 Simulink 模型对图 1 所示的直流配电系统进行仿真验证,并应用了所提的完整控制方案。系统参数如表 1 所示,所有控制器增益见表 2。表中, C_c 为存储设备容量。

表 1 系统参数

元件参数	参数值	元件参数	参数值
L_b/mH	50	$C_1, C_2/mF$	1.1
R_s/Ω	0.075	C/mF	1
C_0/F	5000	L_L/mH	0.5
R_{o1}, R_{o2}	0.05	R_L/Ω	0.15
$V_{o1}, V_{o2}/V$	200	C_c/F	3000
$R_1, R_2/\Omega$	120		

表 2 控制增益

增益	值	增益	值
K_{pe}	10	K_1	0.010
K_{ie}	0.2	K_2	0.005
K_{pv}	1	K_{n1}	0.02
K_{iv}	20	K_{n2}	0.02

图 4 为负载电阻在不同时刻发生变化时的情形,如在 $t=5\text{ s}$ 时负载电阻从 $35\ \Omega$ 阶跃下降到 $32\ \Omega$,而在 $t=15\text{ s}$ 时,负载电阻从 $32\ \Omega$ 增加到 $38\ \Omega$ 。

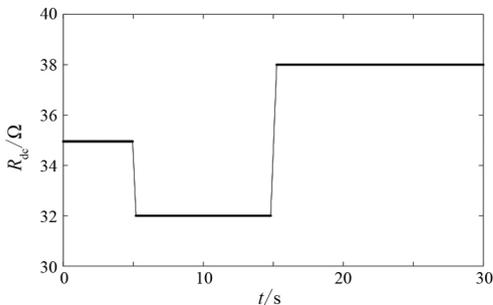


图 4 负载电阻部分的变化

同时,考虑局部恒定功率负载,通过改变系数 x_1 和 x_2 ,可以实现电流源 I_{i1} 和 I_{i2} 在其额定值附近发生变化。如图 5 所示,在 $t=10\text{ s}$ 时,电流源 1 向系统注入的功率由 80% 变为 90%,即 x_1 由初始值 0.8 增加到 0.9;而在 $t=20\text{ s}$ 时,电流源 2 向系统提供的功率由 60% 增加到 80%,即 x_2 从初始值 0.6 变为 0.8。

值得注意的是,由于下垂系数的数值极小,在分析中忽略微小的直流电压偏差是合理的,并且可以将恒功率负载有效替代为恒流源。这一假设在预期的整个工作区域内均成立,因此它并非“微小信号”假设,且实际上并未影响系统的非线性特性。这一点通过所展示的结果得到了充分验证,其中恒功率负载被精确模拟(未视为恒流源)。

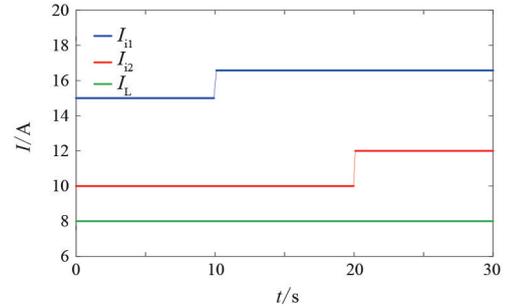


图 5 各 DER 母线的净输入功率和恒负载电流

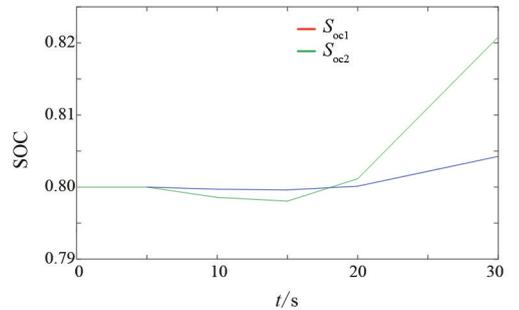


图 6 电池支路的荷电状态

图 6 为两种存储设备(电池)的 SOC 曲线。同时,需要注意的是,电池荷电状态的计算由式(27)得出。

$$S_{oc} = S_{oc,in} - \frac{1}{C_c} \int I_b dt \quad (27)$$

式中, $S_{oc,in}$ 为电池初始荷电状态初始值,取 0.8。

图 7 为两个电池支路的功率分布。可以看到,基于直流电压/功率下垂的控制器在快速充电和慢速充电支路之间实现了接近 5:1 的功率平衡,并且在第一个分支 SOC 上实现了 5:1 的变化率。在整个运行期间,共享比率的准确性得到了保持,同时通过双向变换器,电能可在储能装置和直流微电网之间实现了双向流动。

图 8 为各电池支路的电流仿真结果,由图可知预期的 5:1 的分配率得到了实现。该比率同样也体现在 I_{b1} 和 I_{b2} 之间,并且在电阻负载和电流源发生变化后,它们迅速趋向于稳态值。 I_{b1} 和 I_{b2} 的电流在正值和负值之间变化,这反映了两个储能装置的充放

电过程。这些过程满足了各时刻的电力需求,确保了整个直流配电系统的功率平衡。值得注意的是,当负载电阻下降时,出现正电流值,此时两个电池支路都向系统注入电力,作为 DER 的补充电源。

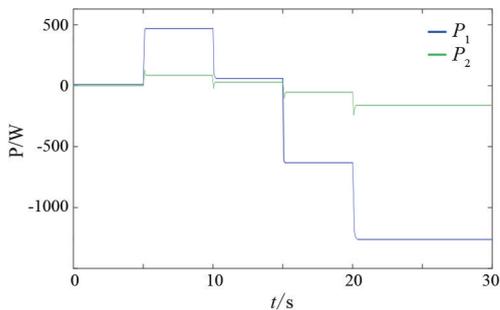


图7 各电池支路的功率

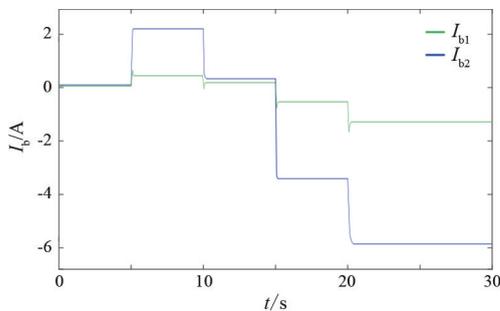


图8 各电池支路的电流

图9为负载节点的直流电压仿真结果,从图中可以看出,负载节点的电压在短暂的瞬态周期后迅速接近其预定义标称值 $V_{dc} = 400\text{ V}$ 。与稳态值的偏差很小,稳定性能和收敛至平衡点的情况与理论分析一致。观察到的小偏差反映了电压水平与下垂系数施加的分流比之间的权衡。事实上,无论工作条件如何,直流电压始终保持在非常接近400 V的水平。

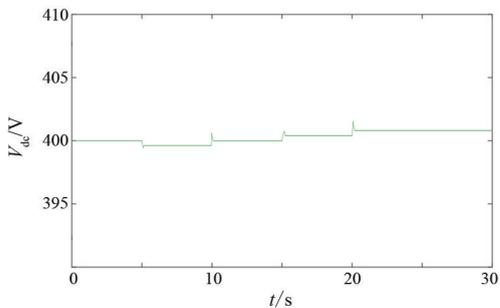


图9 负载节点的直流电压

在所有情况下,系统都表现出有限的瞬态行为,具有有限的过冲且无振荡。由于外环PI和下垂控制器的作用,系统稳定在所需的平衡状态。所实施的控制方案使系统有效、平稳地进入稳态,验证了稳

定性分析的有效性。

所提方法的说明如下:

1)所提出的控制策略适用于具有多种DER和储能设备的自主直流微电网系统,特别是在具有随机性和间歇性的可再生能源发电场景下。该策略适合用于城市和工业环境中的直流配电网络,其中负载需求波动较大且需要快速响应的场景。

2)当系统中出现新的可再生能源或负载类型,或现有设备的特性发生变化时,需要调整控制参数以确保系统稳定性和效率。在不同的网络拓扑或连接方式下,如增加或移除某些节点或支路,可能需要重新评估并优化控制策略。在极端的负载波动或不可预见的故障条件下,可能需要引入额外的控制机制或调整现有的控制参数以维持系统性能。

3)可以通过实时监测和数据分析进一步优化控制策略,以提高系统的动态响应能力。使用先进的机器学习算法预测负载和发电变化趋势,并相应调整控制策略以提高适应性。

5 结论

上面对于基于PI级联和下垂控制器的直流配电系统进行了深入研究:

1)通过构建系统的完整非线性模型,验证了PI级联和下垂控制器的设计在直流配电系统中的有效性,并进行了稳定性分析。

2)提出了一个快速充电和慢速充电电池单元之间的电荷共享场景,确保系统在不同负载条件下的稳定运行。

3)理论分析和仿真结果表明,系统在快速负载变化和多种DER功率注入的情况下,能够在稳定区域内高效运行,体现出良好的瞬态和稳态响应性能。

4)实验验证了系统的动态响应能力和功率平衡管理能力,证明了所提控制方案在改善直流微电网效率和可靠性方面的潜力。未来工作将进一步优化控制策略,以适应更复杂的网络拓扑和动态条件。

参考文献

- [1] 资京,丘东元,肖文勋,等.电动汽车三相无线充电系统关键技术研究综述[J].电源学报,2022,20(6):

- 24-33.
- [2] 王浩, 康博阳, 郑征, 等. 考虑电动汽车灵活储能的交直流混合微电网功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(5):2009-2025.
- [3] 杨乐新, 姚荣斌. 开关损耗降低的 MMC 混合脉宽调制策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(11):84-87.
- [4] YU X Y, SALATO M. An optimal minimum-component DC-DC converter input filter design and its stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2):829-840.
- [5] KAHROBAEIAN A, MOHAMED Y A-R I. Analysis and mitigation of low frequency instabilities in autonomous medium-voltage converter-based microgrids with dynamic loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4):1643-1658.
- [6] RADWAN A A, MOHAMED YA. Analysis and active-impedance-based stabilization of voltage-source-rectifier loads in grid-connected and isolated microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 3:563-576.
- [7] LAGO J, HEIDWEIN M L. Operation and control-oriented modeling of a power converter for current balancing and stability improvement of DC active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):877-885.
- [8] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J M. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4):1900-1913.
- [9] 钱峰, 皮杰, 刘俊磊, 等. 微电网建模与控制理论综述[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(12):1044-1054.
- [10] ANAND S, FERNANDES B G. Reduced-order model and stability analysis of low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1):5040-5049.
- [11] KWASINSKI A, KREIN P T. Passivity-based control of buck converters with constant-power loads [C]//2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC 2007), June 17-21, Orlando, FL, USA. IEEE, 2007:259-265.
- [12] PEYGHAMI S, DAVARI P, MOKAHTARI H, et al. Synchronverter-enabled DC power sharing approach for LVDC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10):8089-8099.
- [13] ANAND S, FERNANDES B G. Reduced-order model and stability analysis of low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1):5040-5049.
- [14] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16):27-31.
- [15] ONWUCHEKWA C N, KWASINSKI A. Analysis of boundary control for buck converters with instantaneous constant-power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(8):2018-2032.
- [16] KWASINSKI A, ONWUCHEKWA C N. Dynamic behavior and stabilization of DC microgrids with instantaneous constant-power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):822-834.
- [17] NIISSON D, SANNINO A. Load modelling for steady-state and transient analysis of low-voltage DC systems [C]//Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2024. 39th IAS Annual Meeting, October 3-7, 2004, Seattle, USA. IEEE, 2004:1-7.
- [18] RUDRARAJU S R, SRIVASTAVA A K, SRIVASTAVA S C, et al. Small signal stability analysis of a shipboard MVDC power system [C]//2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), April 20-22, 2009, Baltimore, MD, USA. IEEE, 2009:135-141.
- [19] GRIFFO A, WANG J B. Modeling and stability analysis of hybrid power systems for the more electric aircraft[J]. Electric Power System Research, 2012, 82(1):59-67.
- [20] 陆城, 胡文斐, 张伟强. 用于快速充电站的高频高效模块化固态变压器[J]. 电源学报, 2021, 19(6):74-82.
- [21] LU X N, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 61(6):2804-2815.
- [22] LI C D, DRAGICEVIC T, DIAZ N L, et al. Voltage scheduling droop control for state-of-charge balance of distributed energy storage in DC microgrids [C]//2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), May 13-16, 2014, Cavtat, Croatia. IEEE, 2014:1310-1314.

估方法的研究[J].绝缘材料, 2013, 46(6):19-24.

[4] 申娴,杨韬,高铭晶,等.控制电缆用阻燃 PVC 体积电阻率检验周期探析[J].光纤与电缆及其应用技术, 2023(1):31-34.

[5] 李在辉,胡源,宋磊,等.聚氯乙烯电缆料老化前后的火灾危险性研究[J].火灾科学, 2011, 20(1):56-61.

[6] 崔刘芳.低倍过载聚氯乙烯电线的火灾危险性研究[J].绝缘材料, 2013, 46(3):24-27.

[7] 付诗禧,陈志辉,彭玉培,等.软质聚氯乙烯电缆材料的抗老化与耐腐蚀性能研究[J].塑料科技, 2023, 51(5):62-65.

[8] 宋海硕,魏涛,慈书亭,等.聚氯乙烯材料老化性能研究进展[J].塑料工业, 2015, 43(9):1-4.

[9] 单威威,王健.电线电缆绝缘材料燃烧及热老化研究进展[J].塑料, 2020, 49(3):151-155.

[10] 李明珠,单黎明,孙浩.B1 级阻燃电缆与其所用护层材料的热释放相关性分析[J].电线电缆, 2020(6):12-16.

[11] 罗夏,黄成家,毕昆,等.开放和封闭空间内不同间隙的竖向电缆燃烧试验研究[J].安全与环境学报, 2017, 17(3):975-979.

[12] 王勇.热老化对 RVV 电缆绝缘层内部结构与绝缘失效机理的研究[J].中国塑料, 2014, 28(12):67-72.

[13] 赵艳萍,刘申友,张和平,等.聚氯乙烯电缆绝缘材料热解机理与动力学参数研究[J].消防科学与技术, 2012,31(4):329-332.

[14] 王健,单威威,张雪月,等.临界温度下 ZR-BVR 绝缘材料老化热解特性研究[J].绝缘材料, 2018, 51(9):15-20.

[15] MUN S Y, HWANG C H. Experimental and numerical studies on major pyrolysis properties of flame retardant

PVC cables composed of multiple materials[J]. Materials, 2020, 13(7):1712.

[16] ZHOU J J, LIU G J, WANG S B, et al. TG-FTIR and Py-GC/MS study of the pyrolysis mechanism and composition of volatiles from flash pyrolysis of PVC[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(6):2362-2370.

[17] 全国电线电缆标准化技术委员会.电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 32 部分:聚氯乙烯混料专用试验方法 失重试验 热稳定性试验:GB/T 2951.32—2008[S].北京:中国标准出版社, 2008.

[18] 全国化学标准化技术委员会有机化工分技术委员会.红外光谱分析方法通则:GB/T 6040—2019[S].北京:中国标准化出版化, 2019.

[19] 南玮,吴爱军.阻燃电缆的热解动力学及反应机理研究[J].消防科学与技术, 2022, 41(1):123-127.

[20] 高亚萍.阻燃电缆绝缘材料聚氯乙烯热解特性研究[J].工程塑料应用, 2007(3):44-47.

[21] 罗希韬,王志奇,武景丽,等.基于热重红外联用分析的 PE、PS、PVC 热解机理研究[J].燃料化学学报, 2012, 40(9):1147-1152.

[22] YU J, SUN L S, MA C, et al. Thermal degradation of PVC: A review[J]. Waste management, 2016, 48:300-314.

[23] 武鹏,李齐方,康鹏,等.PVC 型材耐候性能研究进展[J].塑料工业, 2017, 45(5):1-5.

作者简介:

朱 军(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电网防灾减灾、输电线路运维及检修技术;
黎柏城(1999),男,硕士研究生,研究方向为电力电缆绝缘材料。

(收稿日期:2024-05-11)

(上接第 34 页)

[23] TUCCI M, RIVERSO S, VASQUEZ J C, et al. Voltage control of DC islanded microgrids: A decentralized scalable approach[C]//2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), December 15-18, 2015, Osaka, Japan. IEEE, 2015:3149-3154.

[24] KHALIL H K. Nonlinear Systems [M]. 3rd ed. Upper Saddle River; Prentice-Hall, 2002.

[25] KONSTANTOPOULOS G C, ALEXANDRIDIS A T. Stability and convergence analysis for a class of nonlinear passive systems [C]// 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), December 12-15, 2011, Orlando, FL,

USA. IEEE, 2011:1753-1758.

[26] KONSTANTOPOULOS G C, ALEXANDRIDIS A T. Generalized nonlinear stabilizing controllers for Hamiltonian passive systems with switching devices[J].IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4):1479-1488.

作者简介:

寇志豪(1994),男,硕士,工程师,研究方向为新能源并网稳定性;
曹建旗(1994),男,硕士,工程师,研究方向为新能源并网稳定性。

(收稿日期:2024-07-31)