

基于反馈线性化的直流微电网全局稳定方法

杨忠林, 查晓明, 孙建军, 刘 飞

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 建立直流微电网的数学模型, 分析得出直流微电网的小信号稳定区域。为扩大直流微电网的稳定区域, 提出反馈线性化的直流微电网稳定方法。应用 Lyapunov 稳定性理论, 通过非线性反馈控制, 克服直流微电网中恒功率负载的非线性影响, 使得整个系统线性化, 并确保系统全局稳定。仿真实验结果验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 直流微电网; 全局稳定; 反馈线性化; Lyapunov 稳定性理论; 稳定性; 模型

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.002

0 引言

鉴于一次性化石能源消耗殆尽及生态环境日益恶化, 越来越多的国家鼓励发展分布式的清洁可再生能源, 如太阳能电池、燃料电池、风力机和小型燃气轮机热电联产等。分布式发电对环境污染少, 能就地消化电力, 节省输变电投资和费用; 但分布式电源单机接入成本高、控制困难, 相对大电网是一个不可控源, 对电力系统的稳定性有负面影响, 限制了其效能的充分发挥。为协调大电网与分布式发电间的矛盾, 充分挖掘分布式发电为电网和用户带来的价值和效益, 采用微电网形式将分布式电源并入大电网是较为有效的途径^[1-4]。根据母线电压的不同, 微电网可分为直流微电网和交流微电网。相对于交流微电网, 直流微电网具有效率高、控制简单、可靠性高及电能品质好等优点, 逐步受到广泛关注^[5-9]。但直流微电网中含大量电力电子装置, 其特性表现为恒功率负载, 可能引起直流微电网母线电压不稳定^[10-12]。

目前对直流微电网稳定性的研究文献报道并不多。文献[7]分析了直流级联电力电子系统的稳定条件, 并总结了提高直流微电网稳定性的措施。文献[8]把直流微电网看成一个整体, 通过增加有源阻尼信号改变大电网接口变换器的等效阻抗, 进而提高直流微电网稳定性。而文献[13]提出在负荷点变换器中引入虚拟电容进而提高系统稳定性的方法。以上文献在建立直流微电网的模型时都未考虑微电网中电缆阻抗对稳定性的影响。文献[2]建立了含有电缆阻抗的直流微电网的简化模型, 提出了直流微电网稳定的充分条件, 但并没有提出改进微电网稳定性的措施。本文应用 Lyapunov 稳定性理论, 通过反馈线性化, 克服了直流微电网中恒功率负载的非线性, 进而确保了直流微电网的全局稳定。

1 直流微电网的系统模型

典型的直流微电网结构如图 1 所示^[14], 其中包含

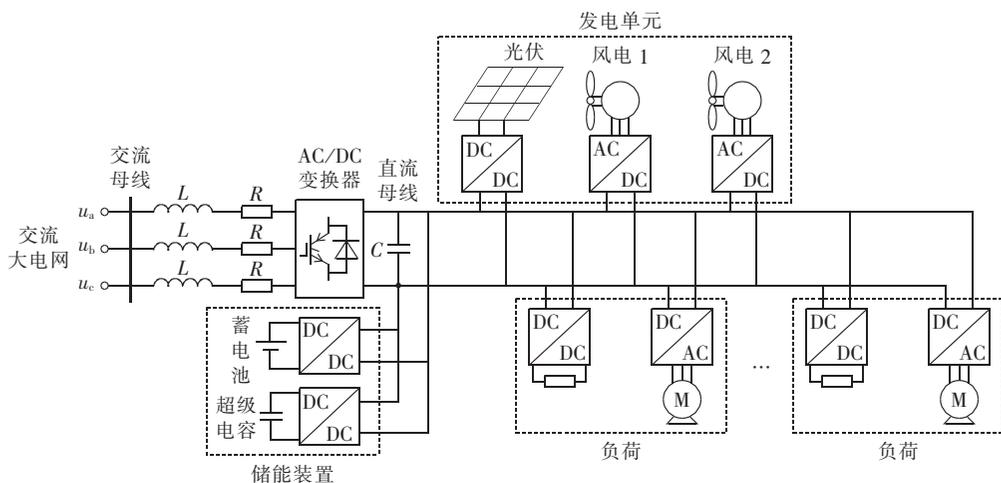


图 1 直流微电网结构

Fig.1 Structure of DC microgrid

收稿日期: 2014-12-16; 修回日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51277137)

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51277137)

大量的电力电子变换器。源侧 AC/DC 变换器将直流微电网与大电网连接,稳定微电网母线电压,相当于直流微电网的恒定电压源。而各种发电、储能以及负荷单元也都通过变换器与直流微电网相连。当负荷点变换器工作于恒压模式并且控制性能良好的时候,负荷点变换器及其负载相对于直流微电网为恒功率负载^[15-17]。

为分析简便,本文考虑直流微电网的简化模型如图 2 所示。

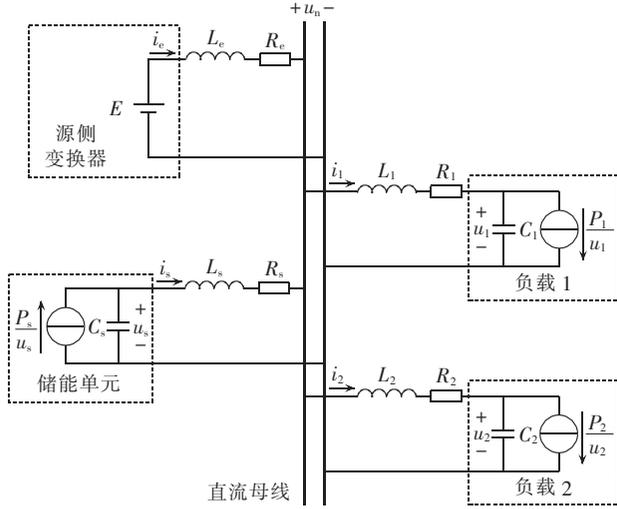


图 2 直流微电网的简化模型

Fig.2 Simplified model of DC microgrid

该微电网包含 2 个恒功率负载和 1 个储能单元,并通过源侧变换器与大电网相连。储能单元采用恒功率控制。由于负载单元、储能单元和源侧变换器并不能总是放置于同一地点,它们之间需要通过长电缆连接,因此必须考虑电缆阻抗对系统稳定性的影响。 L_e 和 R_e 分别为源侧变换器输出电缆的电感和电阻, L_s 和 R_s 分别为储能单元输出电缆的电感和电阻, L_1 和 L_2 及 R_1 和 R_2 分别为负载输入电缆的电感和电阻, C_s 、 C_1 和 C_2 分别为相应变换器的滤波电容, u_n 为直流母线电压。

2 系统的小信号稳定分析

根据电路结构,列写电路方程,可得:

$$\begin{cases} L_e di_e/dt = E - u_n - R_e i_e \\ L_s di_s/dt = u_s - u_n - R_s i_s \\ L_1 di_1/dt = u_n - u_1 - R_1 i_1 \\ L_2 di_2/dt = u_n - u_2 - R_2 i_2 \\ i_e + i_s = i_1 + i_2 \\ C_s du_s/dt = P_s/u_s - i_s \\ C_1 du_1/dt = i_1 - P_1/u_1 \\ C_2 du_2/dt = i_2 - P_2/u_2 \end{cases} \quad (1)$$

选取 $i_e, i_s, i_1, u_s, u_1, u_2$ 为系统的状态变量,对式(1)整理可得:

$$\begin{cases} (L_e + L_2) \frac{di_e}{dt} + L_2 \frac{di_s}{dt} - L_2 \frac{di_1}{dt} = \\ E - u_2 - (R_e + R_2)i_e - R_2 i_s + R_2 i_1 \\ L_2 \frac{di_e}{dt} + (L_s + L_2) \frac{di_s}{dt} - L_2 \frac{di_1}{dt} = \\ u_s - u_2 - R_2 i_e - (R_s + R_2)i_s + R_2 i_1 \\ -L_2 \frac{di_e}{dt} - L_2 \frac{di_s}{dt} + (L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} = \\ u_2 - u_1 + R_2 i_e + R_2 i_s - (R_1 + R_2)i_1 \\ C_s du_s/dt = P_s/u_s - i_s \\ C_1 du_1/dt = i_1 - P_1/u_1 \\ C_2 du_2/dt = i_e + i_s - i_1 - P_2/u_2 \end{cases} \quad (2)$$

系统的平衡点满足以下方程:

$$\begin{cases} E - U_2 - (R_e + R_2)I_e - R_2 I_s + R_2 I_1 = 0 \\ U_s - U_2 - R_2 I_e - (R_s + R_2)I_s + R_2 I_1 = 0 \\ U_2 - U_1 + R_2 I_e + R_2 I_s - (R_1 + R_2)I_1 = 0 \\ P_s/U_s - I_s = 0 \\ I_1 - P_1/U_1 = 0 \\ I_e + I_s - I_1 - P_2/U_2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, U, I 为前述相应 u, i 在平衡点处的稳态值。

对式(2)在其平衡点处进行小信号线性化得:

$$d\hat{X}/dt = T^{-1}A_1\hat{X} = A\hat{X} \quad (4)$$

$$T = \begin{bmatrix} L_e + L_2 & L_2 & -L_2 & 0 & 0 & 0 \\ L_2 & L_s + L_2 & -L_2 & 0 & 0 & 0 \\ -L_2 & -L_2 & L_1 + L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -(R_e + R_2) & -R_2 & R_2 & 0 & 0 & -1 \\ -R_2 & -(R_s + R_2) & R_2 & 1 & 0 & -1 \\ R_2 & R_2 & -(R_1 + R_2) & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -\frac{P_s}{U_s^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{P_1}{U_1^2} & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & \frac{P_2}{U_2^2} \end{bmatrix}$$

$$\hat{X} = [\hat{i}_e \ \hat{i}_s \ \hat{i}_1 \ \hat{u}_s \ \hat{u}_1 \ \hat{u}_2]^T, \quad A = T^{-1}A_1$$

当系统电路参数及储能单元的输出功率 P_s 已经确定时,可计算得出系统的特征值,进而判断出系统是否稳定;当 A 的所有特征值的实部均小于零时,则该平衡点为稳定的平衡点。设系统电路参数如下: $E = 400 \text{ V}$, $L_e = 17.3 \text{ mH}$, $R_e = 0.4 \ \Omega$, $P_s = 1000 \text{ W}$, $C_s = 500 \ \mu\text{F}$, $L_s = 8.3 \text{ mH}$, $R_s = 0.2 \ \Omega$, $L_1 = 40 \text{ mH}$, $R_1 = 0.8 \ \Omega$, $C_1 = 800 \ \mu\text{F}$, $L_2 = 19.6 \text{ mH}$, $R_2 = 0.42 \ \Omega$, $C_2 = 1000 \ \mu\text{F}$ 。可得系统的稳定区域如图 3 所示。

如图 3 所示,当恒功率负载的功率 P_1 和 P_2 较小时,系统是稳定的,但随着恒功率负载的功率逐渐增

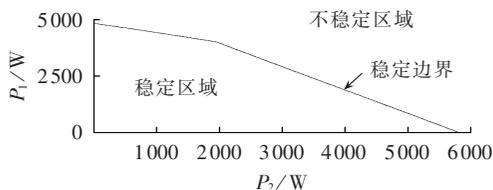


图 3 系统的小信号稳定区域

Fig.3 Small-signal stable area of system

大,系统就有可能变得不稳定。由此可见,系统的不稳定因素主要是由负载的恒功率特性引起的。

当储能单元的输出功率改变时,系统的稳定区域随着改变。如图 4 所示, $P_s > 0$ 表示储能单元向微电网输出功率; $P_s < 0$ 表示储能单元从微电网吸收功率。随着储能系统输出功率的增大,系统的稳定区域也增大,储能单元起到增加系统稳定性的功能。

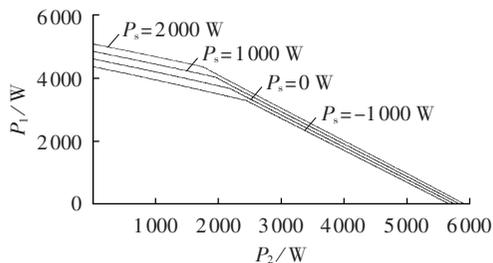


图 4 稳定边界随储能单元输出功率的变化

Fig.4 Border of stable area for different output powers of energy storage unit

3 基于反馈线性化的直流微电网全局稳定方法

由前面分析可知,随着恒功率负载的功率增大,系统有可能变得不稳定。为了在不改变系统参数的情况下,增大系统的稳定区域,避免出现不稳定的风险,给系统增加一个全局稳定模块是一个很好的解决方法。系统的控制图如图 5 所示。整个系统的控制分为 2 层:第一层为变换器的本地控制,维持变换器输出电压的稳定;第二层为全局稳定控制,产生变换器的稳定控制信号 P_{1stab} 、 P_{2stab} 及 P_{sstab} ,这些稳定控制信号仅在系统暂态时具有较大数值,而并不改变系统的平衡点,这将在后面的仿真实验中得到验证。

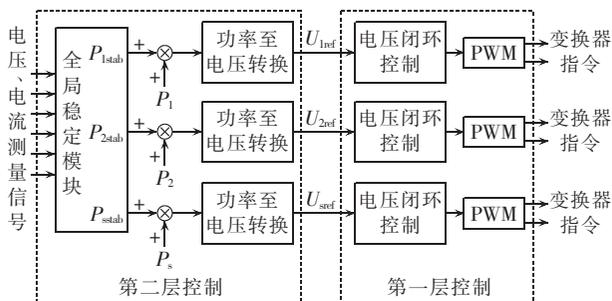


图 5 系统控制图

Fig.5 Schematic diagram of system control

证。稳定控制信号与系统稳态功率叠加,经变换后得到各个变换的输出电压参考电压。

为了克服恒功率负载的非线性特性,并保证系统稳定,本文方法将进行非线性反馈,产生稳定控制信号 P_{1stab} 、 P_{2stab} 及 P_{sstab} ,注入到各个非线性单元,使得整个变为线性系统,从而保证系统的稳定平衡点为全局稳定平衡点,而不再是小信号稳定平衡点。为了计算得到稳定控制信号 P_{1stab} 、 P_{2stab} 及 P_{sstab} ,对状态变量进行坐标平移,令:

$$\begin{cases} x_1 = i_e(t) - I_e \\ x_2 = i_s(t) - I_s \\ x_3 = i_1(t) - I_1 \\ x_4 = u_s(t) - U_s \\ x_5 = u_1(t) - U_1 \\ x_6 = u_2(t) - U_2 \end{cases} \quad (5)$$

将式(2)改写为以下形式:

$$T dX/dt = A_2 X + B U \quad (6)$$

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T \quad (7)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -(R_e + R_2) & -R_2 & R_2 & 0 & 0 & -1 \\ -R_2 & -(R_s + R_2) & R_2 & 1 & 0 & -1 \\ R_2 & R_2 & -(R_1 + R_2) & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$U = \begin{bmatrix} u_{11}(t) \\ u_{12}(t) \\ u_{13}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{sstab} U_s - P_s x_4}{U_s (U_s + x_4)} \\ \frac{P_1 x_5 - P_{1stab} U_1}{U_1 (U_1 + x_5)} \\ \frac{P_2 x_6 - P_{2stab} U_2}{U_2 (U_2 + x_6)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由图 4 可知,当 P_1 、 P_2 及 P_s 都为零时,系统稳定,则 $T^{-1}A_2$ 必为 Lyapunov 方程的解,即对于正定对称矩阵 Q ,必有正定对称矩阵 P ,使得:

$$P T^{-1} A_2 + (T^{-1} A_2)^T P = -Q \quad (11)$$

令:

$$U = -(T^{-1} B)^T P X \quad (12)$$

将式(12)代入式(6)可得:

$$\frac{dX}{dt} = [T^{-1} A_2 - T^{-1} B (T^{-1} B)^T P] X = A_3 X \quad (13)$$

此时整个系统转化为线性系统,并且可以按如下证明系统平衡点为全局稳定平衡点。

由于

$$P (T^{-1} B) (T^{-1} B)^T P = [P (T^{-1} B)] [P (T^{-1} B)]^T > 0 \quad (14)$$

其中,“>”表示不等式左边为正定矩阵。

结合式(11)可得:

$$PA_3 + A_3^T P = PT^{-1}A_2 + (T^{-1}A_2)^T P - 2P(T^{-1}B)(T^{-1}B)^T P < 0 \quad (15)$$

其中,“<”表示不等式左边为负定矩阵。即证明了此时系统全局稳定。

由式(10)整理可得:

$$\begin{cases} P_{\text{stab}} = I_s x_4 + u_{11}(t) u_s(t) \\ P_{1\text{stab}} = I_1 x_5 - u_{12}(t) u_1(t) \\ P_{2\text{stab}} = (I_e + I_s - I_1) x_6 - u_{13}(t) u_2(t) \end{cases} \quad (16)$$

4 仿真实验

为了验证前面提出方法的有效性,本文采用 MATLAB/Simulink 搭建了仿真实验模型,其系统结构如图 2 所示,系统参数同第 2 节,变换器的开关频率为 10 kHz, Q 取 $10^{-6}I_6$ (I_6 为 6 阶单位对角矩阵)。仿真实验结果如图 6—9 所示。

如图 6 所示,当系统没有稳定模块,负载 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 2500 \text{ W}$ 时,由式(4)得系统状态矩阵 A 的特征值为 $-16.06 \pm j375.25$ 、 $-1.80 \pm j124.87$ 、 $-0.80 \pm j195.91$,系统处于稳定区域,系统稳定运行。在 0.35 s 时,负载功率上升至 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$,系统的特征值为 $-15.63 \pm j375.15$ 、 $-0.08 \pm j124.47$ 、 $2.07 \pm j195.76$,系统运行于不稳定区域,电压 u_1 、 u_2 发散,并逐渐扩散到直流母线电压 u_n 。

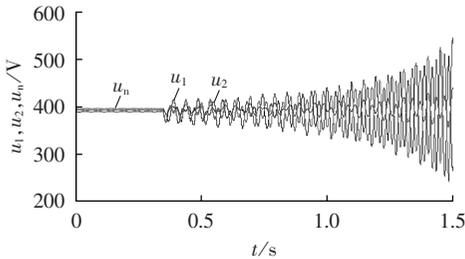


图 6 负载从 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 2500 \text{ W}$ 跃升至 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$ 时的系统响应(无稳定模块)

Fig.6 System response to load step change from $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 2500 \text{ W}$ to $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$ (without stabilization module)

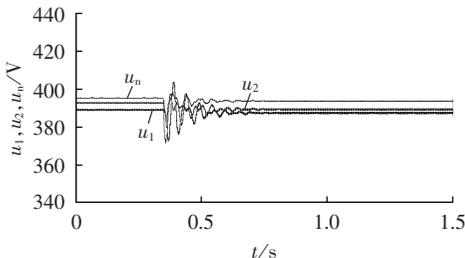


图 7 负载从 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 2500 \text{ W}$ 跃升至 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$ 时的系统响应(有稳定模块)

Fig.7 System response to load step change from $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 2500 \text{ W}$ to $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$ (with stabilization module)

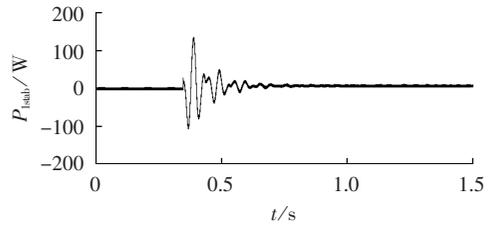


图 8 负载从 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 2500 \text{ W}$ 跃升至 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$ 时的稳定功率 $P_{1\text{stab}}$ (有稳定模块)

Fig.8 Waveform of $P_{1\text{stab}}$ when load changes abruptly from $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 2500 \text{ W}$ to $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$ (with stabilization module)

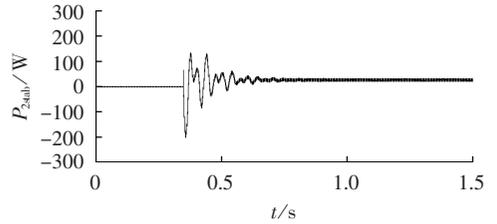


图 9 负载从 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 2500 \text{ W}$ 跃升至 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$ 时的稳定功率 $P_{2\text{stab}}$ (有稳定模块)

Fig.9 Waveform of $P_{2\text{stab}}$ when load changes abruptly from $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 2500 \text{ W}$ to $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$ (with stabilization module)

当系统有稳定模块时,在 0.35 s 时,负载功率上升至 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$,虽然进入了小信号分析的不稳定区域,但系统在反馈控制作用下,由式(13)可得系统的特征值为 $-11.49 \pm j375.29$ 、 $-11.05 \pm j125.81$ 、 $-10.40 \pm j196.79$,系统稳定,负载电压 u_1 、 u_2 及直流母线电压 u_n 仍能维持稳定。

负载功率突变前后,稳定功率 $P_{1\text{stab}}$ 、 $P_{2\text{stab}}$ 分别如图 8 和图 9 所示。稳定运行时 $P_{1\text{stab}}$ 和 $P_{2\text{stab}}$ 的数值都非常小,并不改变系统的稳态平衡点。即使在暂态过程中,稳定功率 $P_{1\text{stab}}$ 、 $P_{2\text{stab}}$ 的最大值相对于负载消耗功率 $P_1 = 3000 \text{ W}$ 、 $P_2 = 4000 \text{ W}$ 也是很小的。因此,本文所提出的方法仅需要小的稳定功率就可以确保整个系统的稳定,这是因为稳定模块的输入包含系统的所有状态变量,可以从系统全局的角度产生适当的稳定功率。

5 结论

本文建立了直流微电网的简化数学模型,其小信号稳定性分析强调,负载功率不能过大从而进入不稳定区域,否则将导致系统故障和损坏。为了在不改变系统参数的同时扩大系统的稳定区域,本文提出了一种基于反馈线性化的稳定方法。该方法基于 Lyapunov 稳定性理论,通过测量系统的状态变量,计算出稳定功率信号,并注入到每个负载的参考功率上,通过反馈控制,使得整个系统线性化,确保了整

个系统的全局稳定。该方法不依赖负载的类型,稳定控制器仅依赖系统的网络结构和参数,且可以扩展应用于多电源多负载的系统。仿真实验结果验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] TOMISLAV D, JOSEP M G, JUAN C V, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2):695-706.
- [2] SANDEEP A, FERNANDES B G. Reduced-order model and stability analysis of low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(11):5040-5049.
- [3] 殷晓刚, 戴冬云, 韩云, 等. 交直流混合微网关键技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(9):43-46.
YIN Xiaogang, DAI Dongyun, HAN Yun, et al. Discussion on key technologies of AC-DC hybrid microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9):43-46.
- [4] 吴卫民, 何运彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1):98-105.
WU Weimin, HE Yunbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1):98-105.
- [5] STANLEY R H, JOSEPH D S. Amplitude death solutions for stabilization of DC microgrids with instantaneous constant-power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1):247-253.
- [6] LU Xiaonan, SUN Kai, JOSEP M G, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6):2804-2815.
- [7] ALEXIS K, CHIMA OBI N O. Dynamic behavior and stabilization of DC microgrids with instantaneous constant-power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):822-833.
- [8] RADWAN A A A, MOHAMED Y A R I. Linear active stabilization of converter-dominated DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):203-216.
- [9] SANDEEP A, BAYLON G F, JOSEP M G. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4):1900-1913.
- [10] DU Weijing, ZHANG Junming, ZHANG Yang. Stability criterion for cascaded system with constant power load[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4):1843-1851.
- [11] MARX D, MAGNE P, NAHID-MOBARAKEH B. Large signal

stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads—a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4):1773-1787.

- [12] ASHOURLOO M, KHORSANDI A, MOKHTARI H. Stabilization of DC microgrids with constant-power loads by an active damping method[C]//2013 4th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference. Tehran, Iran:IEEE, 2013:471-475.
- [13] MAGNE P, MARX D, NAHID-MOBARAKEH B. Large-signal stabilization of a DC-link supplying a constant power load using a virtual capacitor: impact on the domain of attraction [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(3):878-887.
- [14] 李玉梅, 查晓明, 刘飞. 含有多个恒功率负荷的多源直流微电网振荡抑制研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3):40-46.
LI Yumei, ZHA Xiaoming, LIU Fei. Oscillation suppression of multi-source DC microgrid with multiple constant-power loads [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3):40-46.
- [15] LIUTANAKUL P, AWAN A S, PIERFEDERICI B, et al. Linear stabilization of a DC bus supplying a constant power load: a general design approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2):475-488.
- [16] MOSSKULL H, GALIC J, WAHLBERG B. Stabilization of induction motor drives with poorly damped input filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5):2724-2734.
- [17] EMADI A, KHALIGH A, RIVETTA C, et al. Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(4):1112-1125.

作者简介:



杨忠林

杨忠林(1978—),男,江西九江人,博士研究生,主要研究方向为直流微电网稳定性、微电网的分析与控制(E-mail:blueduny@sina.com);

查晓明(1967—),男,安徽怀宁人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为智能电网及新能源发电中的电力电子技术应用、复杂大功率电力电子系统及微电网的分析与控制;

孙建军(1975—),男,江西吉安人,副教授,博士,主要研究方向为大功率电力电子技术应用及其研究、电能质量分析及治理;

刘飞(1977—),男,湖北汉川人,副教授,博士,主要研究方向为光伏发电、直流微电网。

Global stabilization based on feedback linearization for DC microgrid

YANG Zhonglin, ZHA Xiaoming, SUN Jianjun, LIU Fei

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A mathematical model of DC microgrid is established and its small-signal stable area is obtained by analysis. A DC microgrid stabilization method based on feedback linearization is proposed to expand its stable area. The nonlinear influence of the constant-power load in DC microgrid is depressed by the nonlinear feedback control based on the Lyapunov stability theory, which makes the whole system linear and stable. The simulative and experimental results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: DC microgrid; global stability; feedback linearization; Lyapunov stability theory; stability; models