

含有多个恒功率负荷的多源直流微电网振荡抑制研究

李玉梅, 查晓明, 刘 飞

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 分析了带恒功率负荷的级联系统在平衡点稳定的条件, 以两源和两负荷级联系统耦合为例, 通过求解耦合系统的特征值表明, 2 个参数相同的级联系统耦合不能提高其稳定性。探讨了抑制直流微电网振荡的 2 种策略: 一种是通过引入源侧变换器参数的多相性并配合耦合控制参数的取值来抑制振荡; 另一种是通过引入耦合控制的延迟量来消除振荡。仿真结果验证了 2 种策略的可行性和有效性。

关键词: 直流微电网; 恒功率负荷; 振荡; 多相性; 延迟耦合; 稳定性

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.007

0 引言

由于在可靠性、电能质量和效率等方面优于交流电力系统, 直流电力系统受到通信、军舰、工业企业电力系统、商业大厦以及民用住宅等的青睐^[1-7]。在微电网设计时选用直流而不是交流的原因是为现在大多数电子负载、能源储存装置以及分布式能源技术采用的是直流电力。作为微电网技术发展的一个重要分支, 直流微电网虽然在安全性、输电阻塞和消费成本上优于交流微电网, 但是也存在着自身的稳定性问题, 尤其是在直流微电网中存在大功率的恒功率负荷时, 可能会引起直流母线的不稳定^[2,8-11]。

现有的一些文献对直流微电网不稳定机理做了分析, 并提出了一些提高稳定性的措施, 其中 Amr Ahmed A. Radwan 等^[12]把直流微电网看成一个整体, 通过与交流大电网接口变换器的控制器增加有源阻尼信号来改变变换器的等效阻抗, 进而提高稳定性。Junming Zhang 等^[11]针对于带恒功率负荷的级联电力电子系统给出了平衡点稳定的判决条件以及大干扰稳定收敛域的估算方法。Alexis Kwasinski^[10]把提高直流级联电力电子系统稳定性的措施分为 2 类: 一类基于硬件补偿, 例如增加系统阻抗、增加电容值、减小电感值、增加直流母线储能装置以及卸载等; 另一类是基于源侧变换器控制算法实现的, 例如采用线性化控制器以及边界控制器, 并指出采用传统的 PI 控制器不能提高系统的稳定性。而 Pierre Magne^[13]则提出通过对负荷点变换器的参考功率叠加一个容性功率来引入虚拟电容, 进而提高系统的稳定性。因此, 现有的文献对于稳定性的分析基本上都是基于单个级联电力电子系统的, 而直流微电网包含多个分布式电源以及多个负荷, 可以看作多个

级联系统的耦合, 本文正是从多个级联电力电子系统的耦合来研究直流微电网的稳定性的。

1 恒功率负荷的不稳定性

典型的直流微电网结构见图 1, 其中包含大量的电力电子变换装置。当负荷侧变换器与负荷一起工作于恒功率工况时, 与源侧变换器级联就会引起不稳定问题。图 1 所示典型直流微电网, 通常含有多个分布式电源、多个恒功率负荷 (CPL) (一个典型的直流微电网约含有 75%~80% 的恒功率负荷、20%~25% 的阻性负荷^[12], 阻性负荷可以提供正阻尼)。

新能源 (如光伏、风电、燃料电池等) 或储能设备 (如蓄电池、超级电容、飞轮储能等) 都需要通过一个 DC/DC 变换器或 AC/DC 变换器接入直流微电网, 一个简化的级联分布电力系统结构如图 2(a) 所示, 包括分布式能源、源侧变换器、负荷侧变换器, 通常源侧变换器工作于恒压控制, 用于稳定直流母线电压, 而负荷侧变换器工作于恒功率控制, 因此与负荷一起可以等效为恒功率负荷。不论是源侧的 DC/DC 变换器还是 AC/DC 变换器, 其平均开关模型均可简化等效为如图 2(b) 所示电路, 图中二极管表示电流单向流动, R 是线路电阻, L 是变换器电感, C 是直流侧电容, 恒功率负荷用电流源 i_{CPL} 来表示, R_1 是恒阻性负荷, i_L 是输入电流, u_C 是直流母线电压。

$$i_{\text{CPL}}(t) = \frac{P_L}{u_C(t)} \quad \forall u_C(t) \geq \xi \quad (1)$$

其中, P_L 是恒功率负荷的功率; ξ 是任一比较小的正数。描述图 2(a) 平均开关模型动态的微分方程为:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = U_{\text{eq}} - i_L R - u_C \\ C \frac{du_C}{dt} = i_L - \frac{P_L}{u_C} - \frac{u_C}{R_1} \end{cases} \quad i_L \geq 0, u_C > \xi \quad (2)$$

因为大多数源侧变换器在额定工况下的效率达到 96% 以上, 所以可假设 $R=0$, 系统在平衡点 (i_L^*, u_C^*) 处有 $di_L^*/dt=0, du_C^*/dt=0$, 即简化后系统的期望动态

收稿日期: 2013-05-22; 修回日期: 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (E070602)

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (E070602)

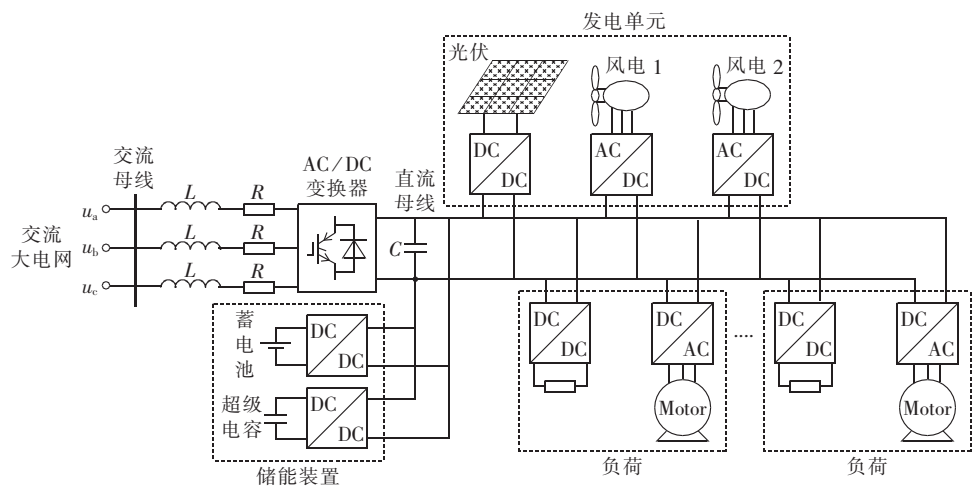


图 1 直流微电网结构
Fig.1 Structure of DC microgrid

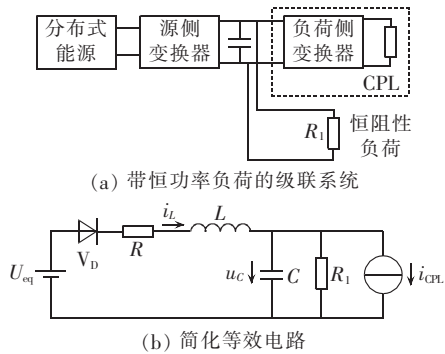


图 2 带恒功率负荷的级联系统及其简化等效电路
Fig.2 Cascaded systems with constant-power loads and corresponding equivalent circuit

特性渐近收敛在如下的平衡点上：

$$(i_L^*, u_C^*) = \left(\frac{P_L}{U_{eq}} + \frac{U_{eq}}{R_1}, U_{eq} \right) \quad (3)$$

式(2)所示系统是一个非线性系统。为了利用李雅普诺夫第一法来分析其在平衡点的稳定性,对式(2)在上述平衡点进行线性化,求其 Jacobian 矩阵为：

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{P_L}{CU_{eq}^2} - \frac{1}{CR_1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

此系统在平衡点渐近稳定的条件是矩阵 J 的迹 $\text{tr}J$ 满足

$$\text{tr}J = \frac{P_L}{CU_{eq}^2} - \frac{1}{CR_1} < 0 \quad (5)$$

即当 $P_L = CU_{eq}^2/R_1$ 时,系统发生分岔现象;当 $P_L < CU_{eq}^2/R_1$ 时,恒功率负荷小于纯阻性负荷,则系统在平衡点渐近稳定;当 $P_L > CU_{eq}^2/R_1$ 时,恒功率负荷大于纯阻性负荷,则系统发生振荡。通常恒功率负荷大于纯阻性负荷,因此式(2)所描述的非线性系统在开环的情况下是不稳定的,文献[10]提到源侧变换器采用常规的 PI 控制器是不能抑制振荡的,并提出可采用线性化控制器和边界控制器来提高系统的稳定性。

为了简化问题,本文仅考虑含有恒功率负荷的情况,即式(2)中, $R_1 = \infty$ 。当然对于实际系统,由于杂散和寄生电阻的存在, $R \neq 0$,平衡点的稳定性取决于恒功率负荷和杂散电阻的大小,但通常情况下,仅靠杂散电阻来抑制振荡是不够的。 $P_L = 2.5 \text{ kW}$, $R = 0.1 \Omega$, $U_{eq} = 200 \text{ V}$, $L = 0.5 \text{ mH}$, $C = 1 \text{ mF}$,建立图 2 的 MATLAB/Simulink 仿真模型,仿真波形见图 3(a)、(b),电感电流和电容电压发生振荡,由图 3(c)的电感电流和电容电压相平面图可看出,电感电流和电容电压稳定在极限环上而非平衡点(200,12.5)上。

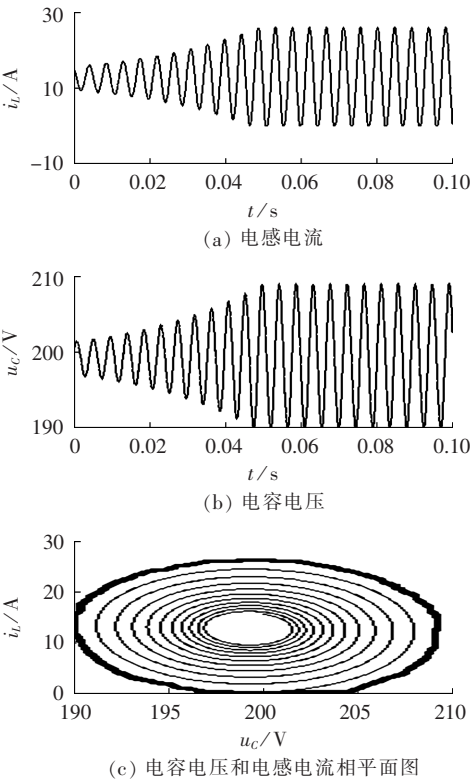


图 3 带恒功率负荷的级联系统仿真波形
Fig.3 Simulative waveforms of cascaded systems with constant-power loads

2 多源直流微电网振荡抑制措施

不失一般性,考虑含 2 个分布式能源的微电网系统,如图 1 中风电 1 和风电 2,且带有 2 个恒功率负荷,见图 4,也可看作 2 个级联系统的耦合。在该系统中,假设 2 台源侧变换器的参数相同,2 个恒功率负荷也相同,忽略线路阻抗,但考虑两级联系统间直流母线电阻为 R_{coupling} ,即假定耦合系数 $\sigma=1/R_{\text{coupling}}$ 。

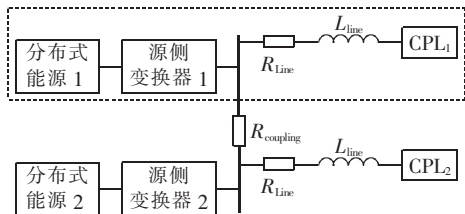


图 4 两源和两恒功率负荷的直流微电网结构
Fig.4 Structure of DC microgrid with two sources and two constant-power loads

由文献[14]知,耦合系统稳定性可由线性模型特征值实部的最大值来评估。若特征值实部最大值是负数,则说明所有特征值实部都是负数,系统在平衡点稳定,而该值幅值越大,状态变量收敛速度越快。这样就可对各耦合系统进行稳定性的定量分析。

2.1 简单的耦合系统

假定 2 个系统之间的耦合电流为:

$$i_{\text{coupling}} = \frac{u_{C2} - u_{C1}}{R_{\text{coupling}}} \quad (6)$$

其中, u_{C1} 和 u_{C2} 分别是源侧变换器 1 和 2 的电容电压。

描述这 2 个耦合系统的动态方程可写为:

$$\begin{cases} L \frac{di_{L1}}{dt} = U_{eq1} - u_{C1} \\ C \frac{du_{C1}}{dt} = i_{L1} - \frac{P_{L1}}{u_{C1}} + \sigma(u_{C2} - u_{C1}) \\ L \frac{di_{L2}}{dt} = U_{eq2} - u_{C2} \\ C \frac{du_{C2}}{dt} = i_{L2} - \frac{P_{L2}}{u_{C2}} + \sigma(u_{C1} - u_{C2}) \end{cases} \quad (7)$$

耦合系统的平衡点为:

$$(i_{L1}^*, u_{C1}^*, i_{L2}^*, u_{C2}^*) = \left(\frac{P_{L1}}{U_{eq1}}, U_{eq1}, \frac{P_{L2}}{U_{eq2}}, U_{eq2} \right)$$

为了研究系统在平衡点的稳定性,考虑其在平衡点线性化后的 Jacobian 矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & \frac{P_{L1}}{CU_{eq1}^2} - \frac{\sigma}{C} & 0 & \frac{\sigma}{C} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{\sigma}{C} & \frac{1}{C} & \frac{P_{L2}}{CU_{eq2}^2} - \frac{\sigma}{C} \end{bmatrix} \quad (8)$$

假定 $P_{L1}=P_{L2}=P_L$, $U_{eq1}=U_{eq2}=U_{eq}$, 则特征值为:

$$\lambda_{1,2} = \frac{P_L}{2CU_{eq}^2} \pm \frac{1}{2U_{eq}^2} \sqrt{\left(\frac{P_L}{C}\right)^2 - \frac{4U_{eq}^4}{LC}}$$

$$\lambda_{3,4} = \frac{P_L}{2CU_{eq}^2} - \frac{\sigma}{C} \pm \frac{1}{2U_{eq}^2} \times$$

$$\sqrt{\left(\frac{P_L}{C}\right)^2 - 4\frac{P_L}{C^2}\sigma U_{eq}^2 + 4\frac{\sigma^2}{C^2}U_{eq}^4 - \frac{4U_{eq}^4}{LC}}$$

特征值 $\lambda_{1,2}$ 与 σ 无关,若为一对共轭复数,其实际部 $\frac{P_L}{2CU_{eq}^2}$ 是大于零的;若特征值均为实数,则其中的

特征值 $\lambda_1 = \frac{P_L}{2CU_{eq}^2} + \frac{1}{2U_{eq}^2} \sqrt{\left(\frac{P_L}{C}\right)^2 - \frac{4U_{eq}^4}{LC}}$ 也大于零,所以这个系统在平衡点是不稳定的。因此不论耦合的强弱,系统总是不稳定的,所以可得出结论:2 个相同的系统耦合不能改变其在平衡点的稳定性。

2.2 参数多相性对振荡的影响

文献[15]中提到对于 2 个耦合的系统,如果 2 个系统对应参数不一致,即参数的多相性,会引起振荡消失。由于在实际制造中,即使设计参数一致,也很难保证 2 个系统参数完全一致,以源侧变换器滤波电感为例,假定 2 个源侧变换器的滤波电感分别为:

$$L_1 = L, \quad L_2 = L(1 + \varepsilon)$$

其中, ε 表征 2 个电感值的差异性,即多相性,可以是生产造成的差异性,也可以是人为设计选取值的不同,增大 ε , 表示系统的多相性增加。系统的 Jacobian 矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & \frac{P_{L1}}{CU_{eq}^2} - \frac{\sigma}{C} & 0 & \frac{\sigma}{C} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & \frac{\sigma}{C} & \frac{1}{C} & \frac{P_{L2}}{CU_{eq}^2} - \frac{\sigma}{C} \end{bmatrix} \quad (9)$$

这个矩阵的特征方程是 4 次的,特征值的解析表达式非常复杂,可以利用劳思-赫尔维茨稳定判据来求取系统稳定的条件,首先计算式(9)矩阵的特征方程,有如下的形式:

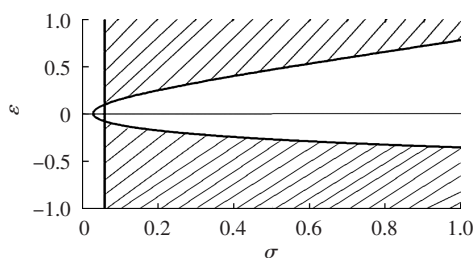
$$|J - \lambda I| = a_0 \lambda^4 + a_1 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda + a_4$$

稳定的条件是特征方程的各项系数为正,并且有 $a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$, 以及 $a_1 a_2 - a_0 a_3 > a_1^2 a_4 / a_3$ 。

针对于式(9)系统稳定的条件为:

$$\begin{cases} \sigma > \frac{P_L}{U_{eq}^2} \\ -2\left(\frac{P_L^2}{CU_{eq}^4} - 2\frac{P_L \sigma}{CU_{eq}^2}\right) - \frac{2 + \varepsilon}{1 + \varepsilon} \frac{1}{L} + \frac{4}{L(2 + \varepsilon)} < 0 \end{cases}$$

假定两耦合系统的参数为: $P_{L1}=P_{L2}=2.5 \text{ kW}$, $R=0$, $U_{eq}=200 \text{ V}$, $L=0.5 \text{ mH}$, $C=1 \text{ mF}$, 使系统稳定的 σ 和 ε 的取值范围如图 5 所示阴影部分。从图中也可以看出当 $\varepsilon=0$ 时,即 2 个参数相同的系统耦合,不

图 5 使系统稳定的 σ 和 ε 的取值范围Fig.5 σ and ε ranges for stabilizing system

管耦合的强弱,系统都是不稳定的(不包含在阴影部分),这与 2.1 节的结论一致。

如当 $\sigma=0.16$ 和 $\varepsilon=0.3$ 时, $\lambda_{1,2}=-42 \pm j1359$, $\lambda_{3,4}=-56 \pm j1289$, 特征值的实部为负,系统是稳定的,电压电流波形如图 6 所示,图 6(a)中相位超前的波形为 u_{C1} ,滞后的波形为 u_{C2} ,图 6(b)中振荡幅值大的为 i_{L1} ,幅值小的为 i_{L2} 。可见引入参数的多相性,消除了振荡,使 2 个振荡的耦合系统都收敛于平衡点。图 7 中阴影部分为可抑制振荡的参数选取值。图 7(a)为 ε 取值 0.2、0.3、0.4, σ 取不同值时对应特征值实部最大值情况。当 σ 比较小时,接近非耦合系统,是不稳定的; ε 越大使系统收敛的 σ 的取值范围越大,而对于同样的 σ ,收敛的速度也越大;当 σ 比较大时,相当于用理想电缆连接 2 个系统,没有足够的阻尼,系统也不稳定。图 7(b)为 σ 取值 0.1、0.16、0.2, ε 取不同值时对应特征值实部最大值情况,表明只有当多相性系数 ε 大于一定值时,才能够起到抑制振荡的作用。 ε 大于一定值时,特征值实部最大值 $\max[\operatorname{Re}(\lambda)]$ 趋于恒定值; σ 越大,使系统收敛的最小的 ε 也越大;但 ε 大于一定值时, σ 越大, $-\max[\operatorname{Re}(\lambda)]$

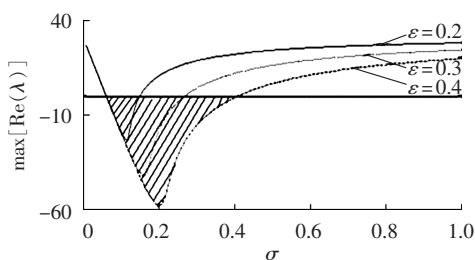
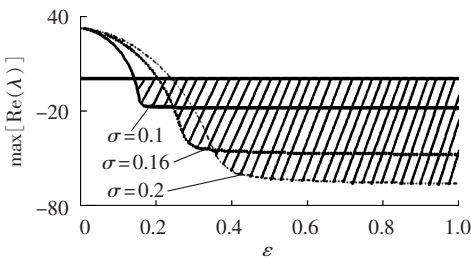
(a) ε 取值 0.2、0.3、0.4, σ 与特征值实部最大值的关系(b) σ 取值 0.1、0.16、0.2, ε 与特征值实部最大值的关系

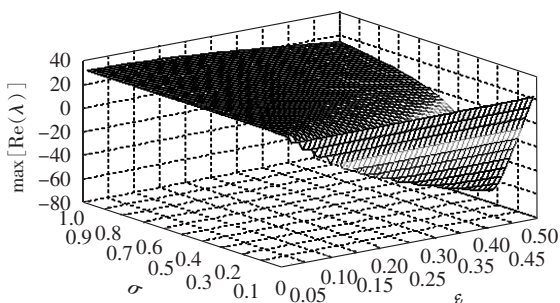
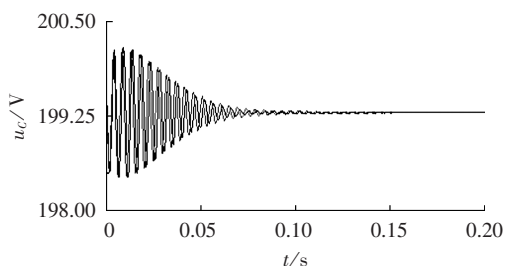
图 7 不同的耦合系数和多相性系数与特征值实部最大值的关系

Fig.7 $\max[\operatorname{Re}(\lambda)]$ vs. ε and σ

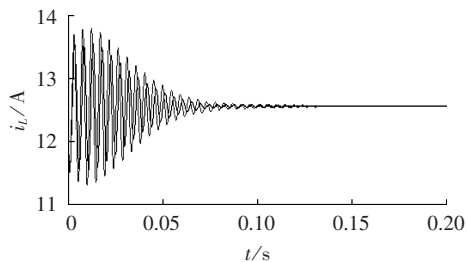
越大,此时系统的收敛速度也越快。

图 8 给出了特征值实部最大值 $\max[\operatorname{Re}(\lambda)]$ 与 ε - σ 的关系,当 $\max[\operatorname{Re}(\lambda)] < 0$ 时,系统在平衡点稳定; $\max[\operatorname{Re}(\lambda)] > 0$,系统不稳定。对于多相性参数 ε 的取值,可以通过选取不同的电感值来实现,对于耦合系数 σ ,取决于两源侧变换器之间的直流母线电阻 R_{coupling} ,而这个电阻取决于母线的长度和材料,通常是不可变的,为了满足设计的需要,可以在负荷侧变换器电流参考值增加控制量来实现,式(7)写为:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = U_{eq1} - u_{C1}(t) \\ C \frac{du_{C1}}{dt} = i_{L1}(t) - \frac{P_{L1}}{u_{C1}(t)} + \frac{1}{R_{\text{coupling}}} (u_{C2}(t) - u_{C1}(t)) - k(u_{C1}(t) - u_{C2}(t)) \\ L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = U_{eq2} - u_{C2}(t) \\ C \frac{du_{C2}}{dt} = i_{L2}(t) - \frac{P_{L2}}{u_{C2}(t)} + \frac{1}{R_{\text{coupling}}} (u_{C1}(t) - u_{C2}(t)) - k(u_{C2}(t) - u_{C1}(t)) \end{cases} \quad (10)$$

图 8 特征值实部最大值与 ε - σ 的关系Fig.8 $\max[\operatorname{Re}(\lambda)]$ vs. ε - σ 

(a) 电容电压



(b) 电感电流

图 6 $\sigma=0.16$ 和 $\varepsilon=0.3$ 对应的电容电压和电感电流波形Fig.6 Capacitor voltage and inductor current waveforms when $\sigma=0.16$ and $\varepsilon=0.3$

其中,耦合系数 $\sigma = \frac{1}{R_{\text{coupling}}} + k$, k 为控制量的增益。

2.3 延迟耦合消除振荡

2.1 节中得到结论,2 个相同的系统耦合不能改变其在平衡点的稳定性,由此引入参数多相性来抑制振荡。参考文献[16]中提到通过延迟耦合也可以使相同频率的振荡环实现振荡消失,并通过实验进行了验证。可以这样理解:对于 2 个振荡系统通过延迟环节的互相引入,使得每个振荡系统都把当前状态拉向对方延迟的状态,如果有足够的耦合强度和时间延迟,2 个振荡器就会渐近收敛到平衡点上。将式(10)方程组第 2 个方程中 $u_{c2}(t)$ 用其延迟量 $u_{c2}(t-\tau)$ 代替,第 4 个方程中的 $u_{c1}(t)$ 用其延迟量 $u_{c1}(t-\tau)$ 代替,考虑延迟耦合,系统的动态方程为:

$$\begin{cases} L \frac{di_{L1}}{dt} = U_{eq1} - u_{C1}(t) \\ C \frac{du_{C1}}{dt} = i_{L1}(t) - \frac{P_{L1}}{u_{C1}(t)} + \frac{1}{R_{\text{coupling}}} (u_{C2}(t) - u_{C1}(t)) - k(u_{C1}(t) - u_{C2}(t-\tau)) \\ L \frac{di_{L2}}{dt} = U_{eq2} - u_{C2}(t) \\ C \frac{du_{C2}}{dt} = i_{L2}(t) - \frac{P_{L2}}{u_{C2}(t)} + \frac{1}{R_{\text{coupling}}} (u_{C1}(t) - u_{C2}(t)) - k(u_{C2}(t) - u_{C1}(t-\tau)) \end{cases} \quad (11)$$

首先对其进行平衡点的线性化,然后对延迟环节进行处理,假定 τ 比较小,可以利用 $L[u_{C1}(t-\tau)] = e^{-\tau s} u_{C1}(s) \approx (1-\tau s) u_{C1}(s)$,其中 $L[\cdot]$ 为拉普拉斯算子。参照上面的推导,系统稳定的条件为:

$$\begin{cases} \frac{k\tau}{C} > 1 \\ \left(\frac{P_{L1}}{CU_{eq1}^2} - \frac{2\sigma}{C} \right) \left(1 - \frac{k}{C} \tau \right) - 2\frac{k}{C} + 2\frac{k^2}{C^2} \tau < 0 \end{cases}$$

对应 MATLAB/Simulink 仿真模型如图 9 所示。

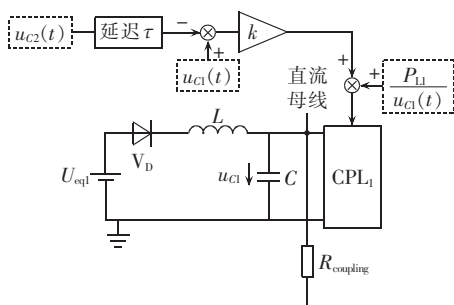
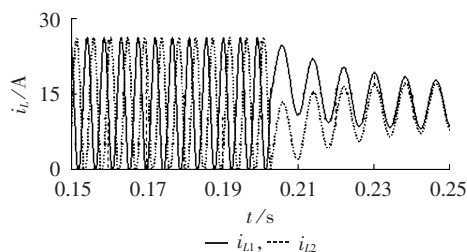


图 9 加入延迟耦合的电路原理图

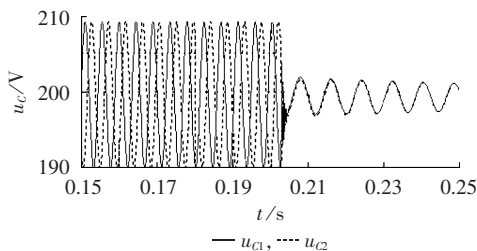
Fig.9 Schematic diagram of circuit with delayed coupling

假设 $P_{L1} = P_{L2} = 2.5 \text{ kW}$, $U_{eq1} = U_{eq2} = 200 \text{ V}$, $L_1 = L_2 = 0.5 \text{ mH}$, $C = 1 \text{ mF}$, 2 个系统之间为弱耦合, 设 $R_{\text{coupling}} = 1000 \Omega$, 可近似为 2 个独立的振荡系统, 在 0.2 s 时采用延迟耦合控制, 选取 $k = 15$, $\tau = 15 \times 10^{-5} \text{ s}$, 由图 10(a)、(b) 所示的仿真波形可以看出, 延迟耦合的作用使 2 个状态不同步的振荡系统首先达到相位一

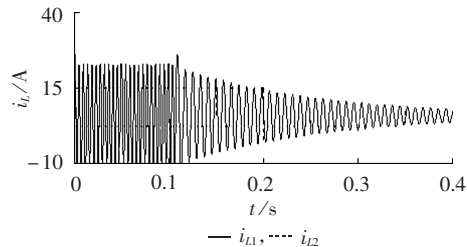
致, 然后收敛于平衡点。如果 2 个系统为强耦合, $R_{\text{coupling}} = 1 \Omega$, 此时的仿真波形如图 10(c)、(d) 所示, 由于耦合较强, 2 个系统状态一致, 在 0.11 s 进行延迟耦合控制, 能同步收敛于平衡点。



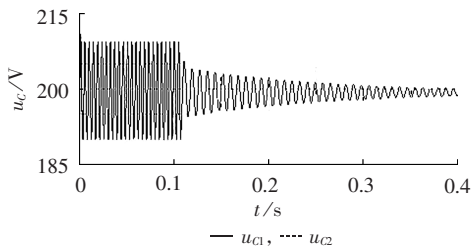
(a) $R_{\text{coupling}} = 1000 \Omega$ 时 2 个电感电流波形



(b) $R_{\text{coupling}} = 1000 \Omega$ 时 2 个电容电压波形



(c) $R_{\text{coupling}} = 1 \Omega$ 时 2 个电感电流波形



(d) $R_{\text{coupling}} = 1 \Omega$ 时 2 个电容电压波形

图 10 不同 R_{coupling} 时延迟耦合控制仿真波形图

Fig.10 Simulative waveforms of delayed coupling control for different R_{coupling}

$R_{\text{coupling}} = 1 \Omega$, 延迟 τ 和增益 k 取不同值时, 仿真波形如图 11 所示, 图 11(a)、(b) 为延迟 $\tau = 11 \times 10^{-5} \text{ s}$ 、 $k = 10$ 时的仿真波形, 此时 2 个系统的电容电压和电感电流仍是振荡的, 由于是在强耦合下, 两电感电流和电容电压波形均基本一致; 保持延迟为 $11 \times 10^{-5} \text{ s}$ 不变, 增大增益 $k = 20$ 时的仿真波形如图 11(c)、(d) 所示, 此时电容电压和电感电流都收敛到平衡点, 系统稳定; 保持增益 $k = 10$ 时不变, 增大延迟为 $13 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时的仿真波形如图 11(e)、(f) 所示, 此时电容电压和电感电流都收敛到平衡点, 系统稳定, 而且延迟 τ 和增益 k 越大, 系统收敛也越快。

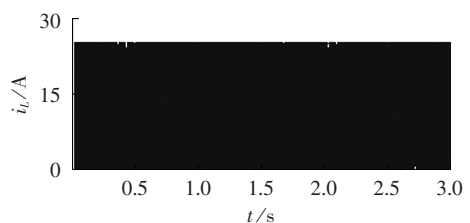
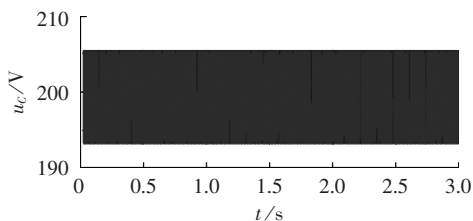
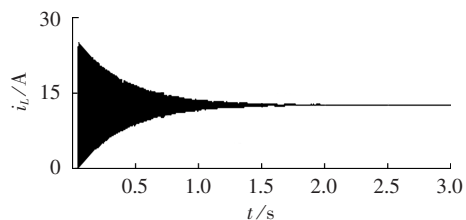
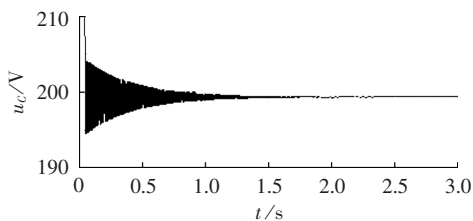
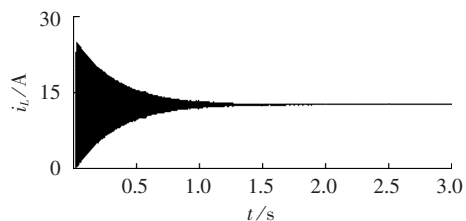
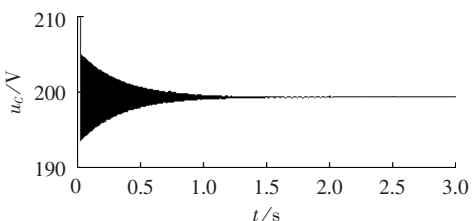
(a) $\tau = 11 \times 10^{-5} s, k = 10$ 时的电感电流波形(b) $\tau = 11 \times 10^{-5} s, k = 10$ 时的电容电压波形(c) $\tau = 11 \times 10^{-5} s, k = 20$ 时的电感电流波形(d) $\tau = 11 \times 10^{-5} s, k = 20$ 时的电容电压波形(e) $\tau = 13 \times 10^{-5} s, k = 10$ 时的电感电流波形(f) $\tau = 13 \times 10^{-5} s, k = 10$ 时的电容电压波形

图11 延迟和增益取不同值时的仿真波形

Fig.11 Simulative waveforms for different τ and k

3 结论

直流微电网中含有大量的恒功率负荷,与源侧变换器级联容易引起直流母线电压振荡,给直流微电网的安全稳定运行带来隐患,与传统抑制振荡的方法不

同,本文从振荡系统的耦合出发,探讨了抑制振荡的2种方法。2个参数完全一样的振荡系统耦合,通过增强耦合控制并不能抑制振荡,如果引入源侧变换器电感的多相性,并选取合适的耦合系数,可以抑制振荡。文中通过大量计算给出了能够抑制振荡的多相性系数和耦合系数的取值范围,并给出了这2个参数不同取值与系统收敛速度关系的定量分析。第2种方法是不改变系统参数,对耦合控制中的状态进行延迟,延迟量和耦合系数增大到一定值时可以抑制振荡。建立了 MATLAB/Simulink 仿真模型,仿真波形验证了这2种方法均可以有效地抑制带恒功率负荷的直流微电网振荡。

参考文献:

- [1] SALOMONSSON D, SÖDER L, SANNINO A. An adaptive control system for a dc microgrid for data centers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(6): 1910-1917.
- [2] ARCIACON V, MONTI A, SULLIGOI G. An innovative generation control system for improving design and stability of medium-voltage DC power systems on ships[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2012, 2(3): 158-167.
- [3] 吴卫民,何远彬,耿攀. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106.
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.
- [4] 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 Zhonghua, AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 86-90.
- [5] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [6] 薛贵挺,张焰,祝达康. 孤立直流微电网运行控制策略[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 112-117.
XUE Guiting, ZHANG Yan, ZHU Dakang. Operational control strategy of stand-alone DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 112-117.
- [7] 钱霞,袁建华,高厚磊,等. 直流微电网光伏发电最大功率点追踪方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 90-93.
QIAN Xia, YUAN Jianhua, GAO Houlei, et al. MPPT of photovoltaic generation for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 90-93.
- [8] GRIFFO A, WANG J, HOWE D. Large signal stability analysis of DC power systems with constant power loads[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, 2008. Harbin, China: IEEE, 2008: 3-5.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] RADWAN A A A, ABDEL-RADY Y I M. Linear active stabilization of converter-dominated DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):203-215.
- [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] MAY R M. Stability in randomly fluctuating versus deterministic environments[J]. The Amer Naturalist, 1973, 107(957):621-650.
- [15] MIROLLO R E, STROGATZ S H. Amplitude death in an array of limit cycle oscillators[J]. J Statistical Phys, 1990, 60:245-262.

- [16] RAMANA D V R, SEN A, JOHNSTON G L. Time delay induced death in coupled limit cycle oscillators[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(23):5109-5112.

作者简介:



李玉梅

李玉梅(1975-),女,山东嘉祥人,博士研究生,主要研究方向为直流微电网控制技术、直流微电网稳定性(E-mail:liyumei75@163.com);

查晓明(1967-),男,安徽怀宁人,教授,博士研究生导师,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;

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

Oscillation suppression of multi-source DC microgrid with multiple constant-power loads

LI Yumei, ZHA Xiaoming, LIU Fei

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

Abstract: The balance-point stability condition of cascaded systems with constant-power loads is analyzed and the eigenvalues of a coupled system with two sources and two loads are solved as an example, which shows that the system stability can not be improved by cascading two systems with same parameters. Two strategies are discussed for DC microgrid oscillation suppression: the coordination of source-side converter parameter heterogeneity with coupling control parameter and the introduction of delayed coupling control. Their feasibility and effectiveness are verified by simulative results.

Key words: DC microgrid; constant-power load; oscillation; heterogeneity; delayed coupling; stability

(上接第33页 continued from page 33)

Electronics, 2012, 27(11):4734-4749.

- [20] 郭小强, 郭伟扬, 赵清林, 等. 三相并网逆变器比例复数积分电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15):8-14.
- GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, ZHAO Qinglin, et al. Current regulation for three-phase grid-connected inverters based on proportional complex integral control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15):8-14.
- [21] 王宝诚, 郭小强, 梅强, 等. 三相并网逆变器脱网运行电压控制技术[J]. 电网技术, 2011, 35(7):91-95.
- WANG Baocheng, GUO Xiaoqiang, MEI Qiang, et al. Intentional islanding voltage control for three-phase grid-connected inverters[J]. Power System Technology, 2011, 35(7):91-95.

作者简介:



彭春华

彭春华(1973-),男,江西乐平人,教授,博士,研究方向为电力系统优化调度、分布式发电控制、微电网运行(E-mail:chinapch@163.com);

王立娜(1988-),女,河北辛集人,硕士研究生,研究方向为微电网系统运行、分布式发电控制技术;

李云丰(1988-),男,湖南常德人,硕士研究生,研究方向为高压直流输电。

Strategy of power-coupling droop control for three-phase inverter in low-voltage microgrid

PENG Chunhua, WANG Lina, LI Yunfeng

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: For the effective control of power quality, the conventional droop control, which is highly dependent on the resistance-inductance ratio of line, is hardly applicable to low-voltage microgrid because it is normally resistive or inductive. An improved $PQ-fU$ power-coupling droop control is proposed based on the theory of conventional droop control and, combined with the high-level energy optimization management and the PCI (Proportional Complex Integral) voltage control, an improved multi-loop control strategy is designed, which flexibly and effectively controls the power quality of resistive or inductive low-voltage microgrid, quickly traces the reference instruction from high-level energy management system and reasonably distributes the output power of distributed generations, suitable for both grid-connecting and islanding modes. The control effect of parallel inverter system in low-voltage microgrid is studied with MATLAB/Simulink, which verifies the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: low-voltage microgrid; distributed power generation; electric inverters; power coupling; droop control; power control