

弱电网条件下全功率变流器的低频振荡抑制措施

陈佳明, 喻俊鹏

深圳市禾望电气股份有限公司, 深圳 518055

摘要: 风场并网容量的增加会增大弱电网的阻抗, 影响电网电压的稳定性, 导致并网变流器产生低频振荡。针对弱电网的低频振荡问题, 在分析电网阻抗对电流环调节能力影响的基础上, 提出了增强电流控制器的调节能力来抑制低频振荡的方法, 结合仿真直观地说明了理论分析的正确性, 并通过平台实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 变流器, 弱电网, 低频振荡

1 引言

受风能资源分布的影响, 我国的风电场往往建立在远离负荷、电网结构相对薄弱的地区。由于成本等因素的限制, 电能的远距离传输往往使电网表现得比较弱, 在很大程度上限制了电网的短路容量。随着风场装机容量的增大, 大量风机接入电网时产生的扰动容易引起电网电压的波动, 严重的时候电网电压甚至面临崩溃的危险^[1]。另一方面, 弱电网下的电网电压质量相对较差, 随着并网风机数量的增加, 不同变流器之间通过电网的阻抗相互耦合, 使电网的等效阻抗成倍增长, 并网变流器的调节能力也会因此而受到限制, 从而容易导致电网与变流器之间产生非特征频率的低频谐波, 影响电网电压的稳定性和变流器的正常运行^[2-3]。

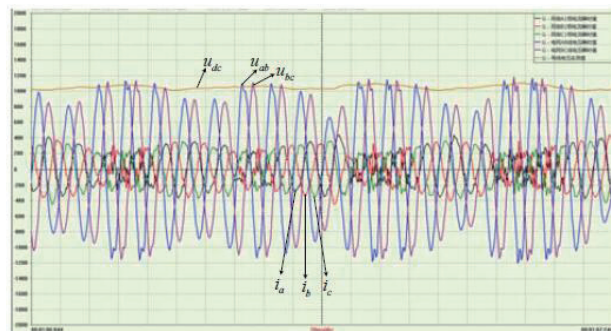
在滤波电容上串联电阻形成无源阻尼可以解决弱电网带来的振荡问题^[4], 这种简单有效的方法在增加系统成本的同时会带来散热和发电效率问题。文献[3]从控制角度提出的电网电压低次前馈法, 能够有效减弱不同变流器之间的相互耦合, 解决弱电网下的高频振荡问题, 但却无法有效抑制目前在弱电网中同时存在的低频振荡现象。低频振荡现象主要表现在直驱机型中, 其振荡频率在数十到几百赫兹之间, 而且常常伴随有出现非特征谐波的畸变现象。

本文主要对变流器在弱电网下运行时存在的低频振荡现象进行了研究。文中首先给出了风场曾出现低频振荡时的波形; 其次从电流控制器入手分析了电网阻抗对变流器运行性能的影响, 从复相量的角度阐述了低频振荡产生的原因, 结合仿真直观地说明了理论分析的正确性; 最后,

通过平台实验验证了理论分析的正确性和所提方法的有效性。除了弱电网下的风场外, 所提方法亦可应用于解决微网中类似的低频振荡问题。

2 弱电网下的风机的低频振荡现象

在电网薄弱的风场装机容量大到一定程度后, 低频振荡现象曾时有发生。图1(a)为某风场曾出现低频振荡时采集的电网电压、变流器的网侧桥臂电流以及直流母线电压的波形。可以看到, 此时的网侧桥臂电流表现为正负对称的周期性振荡, 电网电压在振荡的同时存在比较明显的畸变。直流母线在交流侧低频振荡的影响下也出现了伴随性的波动。这种现象曾主要在直驱型的机型中出现, 早期的双馈机型中基本没出现过, 但是近年来随着装机容量的激增, 此类低频振荡现象在双馈机型的风场中也有发生, 如图1(b)所示。图中 e_{ab} 、 e_{bc} 、 e_{ca} 为电网电压, i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为定子三相电流。鉴于低频振荡在直驱机型中出现较多, 本文将直驱机型为对象进行分析。



(a) 直驱型机型中曾出现的低频振荡现象



(b) 双馈机型中曾出现的低频振荡现象
图 1 风场曾出现的低频振荡现象

3 弱电网下的网侧电压电流低频振荡原因

原本在风场中正常运行的变流器出现的低频振荡现象往往是由装机容量扩大后导致的电网等效阻抗增大引起。这里从理论上对其做一个简单分析。如图 2 所示,变流器网侧采用典型的电压电流双闭环控制模式。目前,电流调节器往往采用同步旋转坐标系下基于 PI 控制器结合电网电压前馈的控制策略,其直接控制目标往往选择网侧桥臂电流。按照能量流动方向,以电流流出变流器方向为正,在考虑电网阻抗时的 dq 轴电流环控制框图如图 3 所示。稳态时, dq 轴之间的耦合可以忽略,由此可以得到入网电流 I_g 与电网电压 E_g 、给定值 I_{ref} 间的关系为:

$$\bar{I}_g = -\frac{3C_f s}{3L_g C_f s^2 + 1} \bar{E}_g + \frac{1}{3L_g C_f s^2 + 1} \frac{G_c}{sL_c + G_c} \bar{I}_{ref} \quad (2)$$

其中,

L_c, L_g —变流器网侧滤波电感和电网等效阻抗

C_f —变流器网侧滤波电容

G_c —电流 PI 控制器

I_L, I_g —网侧桥臂电流及入网电流

式(2)中,入网电流 I_g 与电网电压 E_g 的传函含有一个谐振点,但其对入网电流的低频段基本没有影响。而从第二项可以看出,它与电流环给定值之间幅频特性会同时受电网阻抗和电流环控制器参数的影响。风场单台风机运行时,变流器外部的阻抗与线路阻抗相等,电网等效阻抗较小,变流器的稳态运行特性基本不会受影响。然而随着并网风机数量及容量的增大,单个变流器对应的外部等效阻抗也会成倍增长。图 4 给出了不同电网阻抗及控制器参数下的电流环闭环幅频特性。可以发现,即使理想情况下 ($L_g=0$),在电流控制器调得不够强的时候,电流环对低频段存在一定的

放大作用。较小的电网阻抗的存在可以和变流器网侧 LC 元件组成 LCL 滤波器,在改善滤波效果的同时基本不会对低频段产生明显的影响。然而,电网阻抗继续增大则会加剧电流环在低频段内放大的作用,导致电流环的输入在暂态过程中产生低频分量的时候容易引发低频振荡。

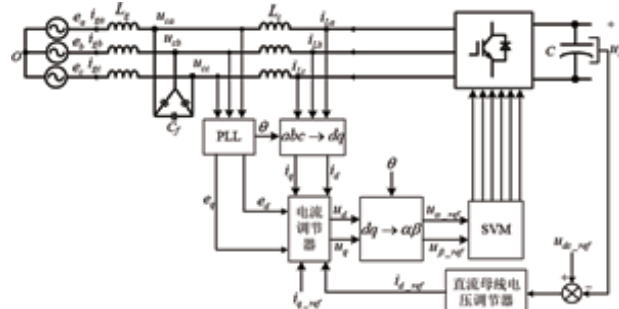


图 2 变流器网侧控制框图

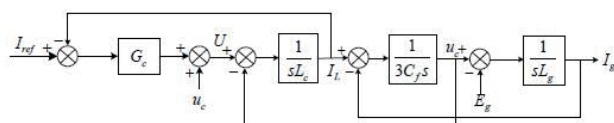


图 3 考虑电网阻抗下的电流环控制框图

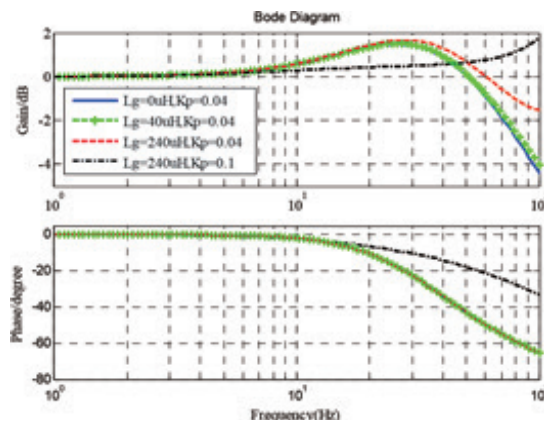


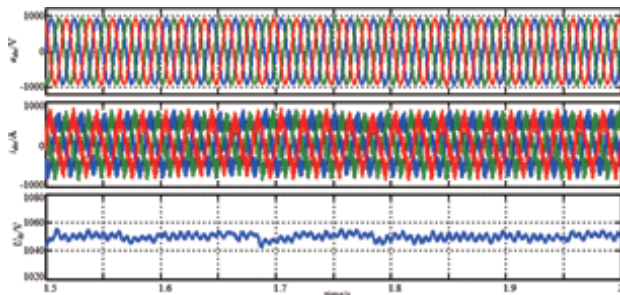
图 4 不同电网阻抗以及控制器参数下电流环幅频特性

4 弱电网下电压电流低频振荡抑制

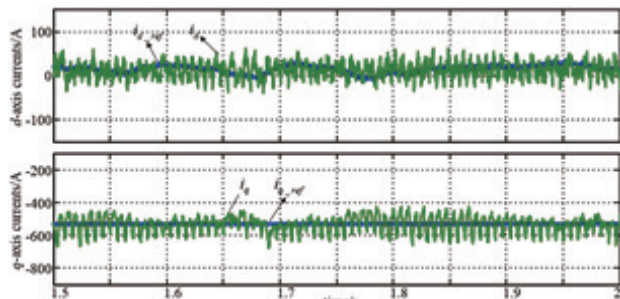
电网阻抗的增大使电流环在低频段内产生放大作用是弱电网下引起电压电流振荡的直接原因。考虑到这一点,可以增强电流环的调节能力以减小电流环在低频段的闭环增益来抑制低频振荡。图 4 中同时给出了 $L_g=240\mu\text{H}$ 时增大电流环比例系数对电流环幅频特性的影响。对比可以发

现, 比例系数的增大能够有力地减小电流环在低频段的放大倍数, 从而有效避免低频振荡的发生, 提高系统的稳定性。

为直观说明电网阻抗对电流环低频段放大作用的影响, 验证增加电流环比例系数在抑制低频谐振方面的有效性, 在 simulink 中进行了仿真。仿真时变流器运行在网侧调制模式, 网侧滤波电感 $L_c=100\mu\text{H}$, 滤波电容角接, $C_f=1000\mu\text{F}$, 变压器漏感为 $40\mu\text{H}$, 直流母线电容为 $28800\mu\text{F}$, 电网线电压 690V , 直流母线电压给定值为 1050V 。首先在电网较为理想的条件下的条件下进行了仿真, 对应的电流环控制器系数为 $K_p=0.04$ 、 $K_i=2$ 。如图 5 所示, 此时的电网等效阻抗主要体现在变压器的漏感上, 电网阻抗较小, 网侧桥臂电流能够很好地跟踪给定并保持稳定, 直流母线电压波动小, 电网电压稳定性好。其次, 保持电流控制器的参数不变, 在变流器与变压器低压侧之间串入 $L_g=240\mu\text{H}$ 的电感用以模拟电网阻抗进行了仿真, 结果如图 6 所示。由于电网阻抗的增大, 此时的电流控制器的调节能力明显受到限制, 网侧桥臂电流因无法准确跟踪给定值而产生了持续性的振荡, 最终引起桥臂电流、直流母线电压以及变流器的并网点电压出现了频率约为 10Hz 的低频振荡, 其结果与图 1 类似, 且其振荡频率

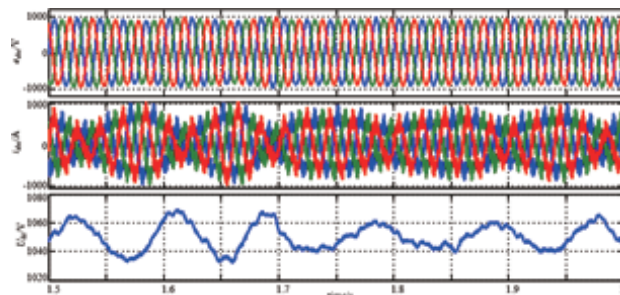


(a) 电网电压、网侧桥臂电流以及直流母线电压

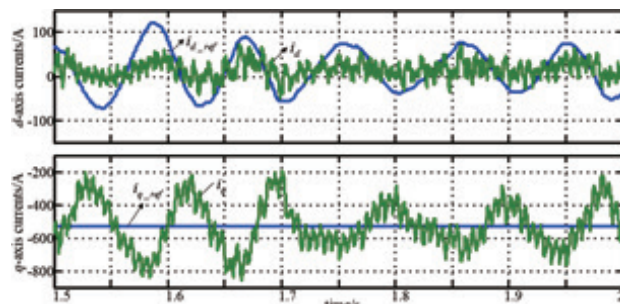


(b)dq 轴下桥臂电流的给定及反馈

图 5 电网较为理想时的仿真结果

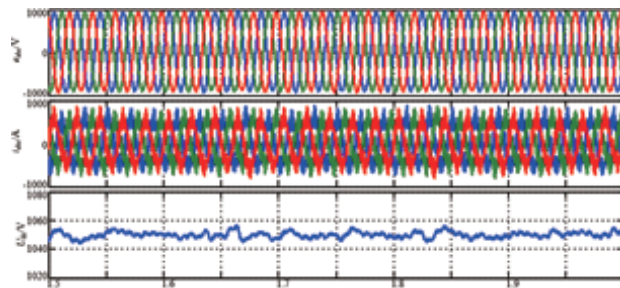


(a) 电网电压、网侧桥臂电流以及直流母线电压

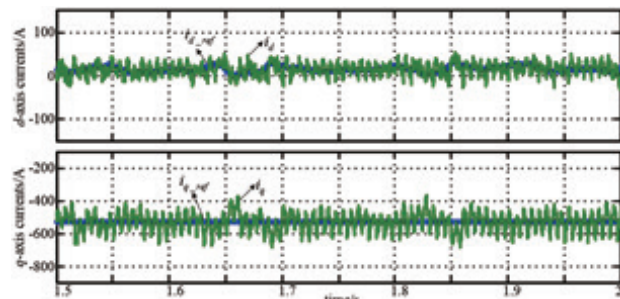


(b)dq 轴下桥臂电流的给定及反馈

图 6 默认参数下电网阻抗增加到 $240\mu\text{H}$ 的仿真结果



(a) 电网电压、网侧桥臂电流以及直流母线电压



(b)dq 轴下桥臂电流的给定及反馈

图 7 电网阻抗为 $240\mu\text{H}$ 时增强电流环比例系数的仿真结果

处在图 3 所示的低频段内。为抑制振荡, 将电流环的比例系数增加到 0.08, 结果如图 7 所示。对比图 6 可以看到, 网侧桥臂电流在电流环增强后得到了有效的控制, 桥臂电流、直流母线电压均能够在给定值附近稳定下来, 并网点电压基本没有受到影响, 电网阻抗增大后的低频振荡现象得到了有效的抑制。

5 实验验证

在电网适应性测试方面, 禾望电气能够提供国内最先进的测试平台。此次的实验验证在 1.5MW 的对拖实验平台上进行。平台结构如图 8 所示, 由两台背靠背的变流器组成, 两变流器的机侧分别连接到永磁同步电机和电励磁同步电机, 两电机均可通过配置工作在电动状态和发电状态。本次实验中配置永磁同步电机作为原动机, 另一台电励磁电机则作为发电机运行。在发电机变流器网侧与变压器之间串入了一个电感 g_L 用以模拟电网阻抗, 两变流器通过同一个漏感为 $80\mu\text{H}$ 的变压器接入电网, 其网侧滤波电感滤、波电容及直流母线电容参数均与仿真时相同, 即 $L_{c1}=L_{c2}=100\mu\text{H}$ 、 $C_{f1}=C_{f2}=1000\mu\text{F}$ 、 $C_{dc1}=C_{dc2}=28800\mu\text{F}$ 。本次实验因验证的需要, 只开发电机的网侧, 使其工作在网侧调制状态。首先将发电机变流器的网侧直接连接到变压器, 在常规条件下进行了实验, 结果如图 9 所示, 图中依次给出了直流母线电压、变流器网侧三相电流以及 AB 和 BC 线电压。可以看到在电网阻抗比较小的时候, 变流器输出电流平稳, 直流母线电压平滑, 对并网点的电压影响很小。其次, 在变流器的网侧与变压器之间串入 $240\mu\text{H}$

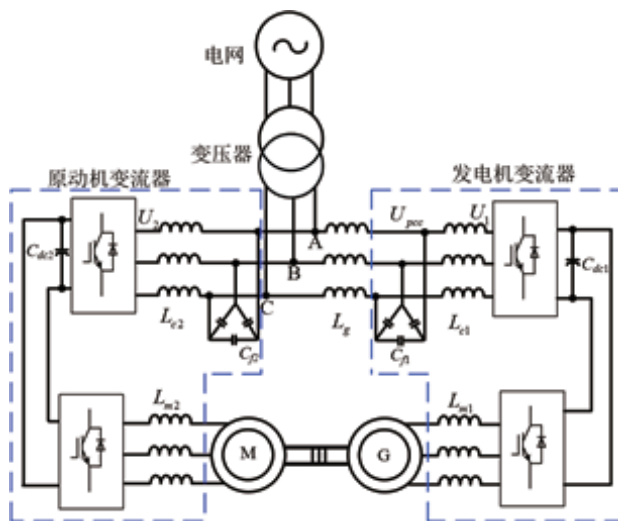


图 8 实验平台示意图

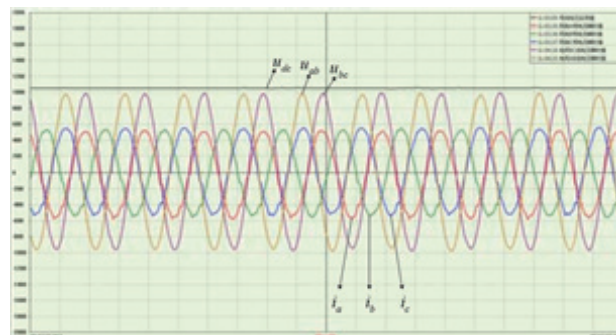


图 9 默认参数下电网较为理想时的实验结果

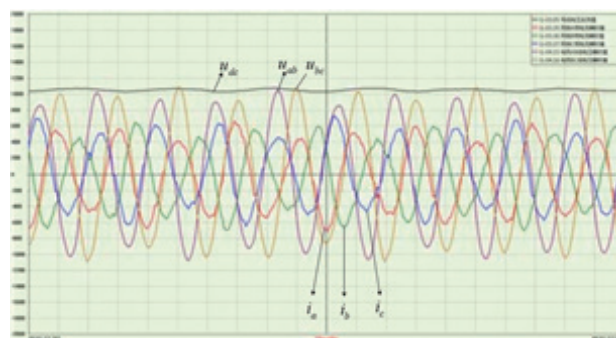


图 10 默认参数下电网阻抗增加到 $240\mu\text{H}$ 的实验结果

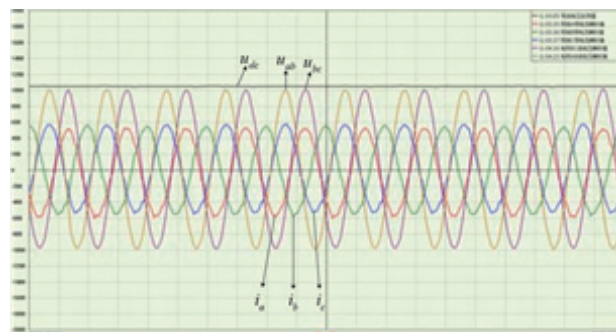


图 11 $240\mu\text{H}$ 电网阻抗下增强电流环比例系数的控制效果

电感用来模拟电网阻抗, 在默认的控制参数和增强电流环比例系数的条件下分别进行了实验, 结果分别如图 10 和图 11 所示。从图 10 可以看出, 默认参数下电网阻抗的增加会引起网侧输出电流产生低频振荡, 致使电网电压不稳以及直流母线电压波动, 使变流器出现图 1(a) 所示的低频振荡现象。图 11 的结果表明, 通过增强电流环比例系数可以有效克服电网阻抗对电流环在低频段带来的不利影响, 解决弱电网下的低频振荡问题。

下转 168 页