

基于高阻抗比的并网系统谐波抑制及无功控制策略

李 昕, 马 群, 齐 磊, 孙孝峰

(电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学电气工程学院), 秦皇岛 066004)

摘 要: 为了保证逆变器系统具有良好稳定性且公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压幅值在允许的电压偏差内,在考虑传输电缆寄生电容的影响和传输电缆特性的前提下,提出谐波抑制方案和无功控制策略结合的双重控制策略,并结合电缆上抑制背景谐波放大现象确定双重控制策略参数的最优取值,以实现系统稳定运行。仿真和实验结果验证了该双重控制策略的可行性和正确性。

关键词: 传输线; 谐波失真; 谐波抑制; 稳定性

中图分类号: TM46

文献标识码: A

0 引 言

随着传统化石能源的日益枯竭,光伏发电、风力发电等新能源发电系统异军突起,成为近年来研究的热点^[1,2]。新能源发电系统通常经逆变器接口实现并网运行,为提高逆变器入网电流的电流质量和系统稳定性^[3,4],根据不同电网状态,合理设计逆变器系统控制方案具有重要意义。

并网逆变器通常使用 LCL 滤波器抑制高频谐振,对于考虑电网等效阻抗的逆变器系统,电网等效阻抗与逆变器阻抗的比值(即阻抗比)变大, LCL 滤波器谐振频率会向低频域移动,当超出可控制的带宽范围,系统会出现谐波含量增加的不稳定现象。由于增大逆变器阻尼能够降低阻抗比而使系统稳定,因此国内外学者提出多种增大逆变器阻尼的方法。文献[5]针对并网逆变器 LCL 滤波器的谐振问题,在电网电流反馈环中加入有源阻尼方案,通过改变滤波电容值来改变谐振频率以模拟不同的电网状态,进而寻找合理的与之匹配的有源阻尼参数,但参数选择过程繁琐,不合适的参数会使系统变得不稳定。文献[6]考虑并联的并网逆变器与电网等效阻抗之间的耦合,为了提高电能质量,通过并联有源阻尼器来动态解决谐振问题,但

额外的有源阻尼器增加了工业成本。然而文献[5,6]未分析传输电缆特性也未考虑传输电缆寄生电容的影响^[7,8],文献[9~11]考虑电网等效阻抗和电缆上的寄生电容的影响,文献[11]使用有源阻尼器抑制在不同频率下的谐振问题,但未考虑不同的有源阻尼参数取值对电缆上各个节点电压的谐波放大现象的影响。以上文献都未研究在单位功率因数并网模式下,并网系统为高阻抗比时,出现的 PCC 电压超限^[12,13]的问题。

综合考虑以上问题,本文在考虑传输电缆寄生电容的影响和传输电缆特性的前提下,提出谐波抑制与无功控制相结合的双重控制策略。在高阻抗比下,该策略不仅可保证逆变器具有良好的稳定性,而且能控制 PCC 电压幅值维持在允许偏差之内。文中针对高阻抗比下的不稳定现象提出谐波抑制方案,在抑制逆变器谐波的同时,兼顾考虑了电缆上抑制背景谐波放大现象,在此基础上确定控制策略参数的最优取值,以提高在高阻抗比下的系统稳定性;同时,逆变器以单位功率因数方式并网时,分析高阻抗比下导致 PCC 电压超限的原因,针对电网等效阻抗呈纯感性和阻性占优的阻感性 2 种情况,提出无功控制策略以解决 PCC 电压幅值波动的问题。

收稿日期: 2016-08-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900300); 国家自然科学基金(51677162); 河北省自然科学基金(E2015203407; E2017203337)

通信作者: 孙孝峰(1970—), 男, 博士、教授, 主要从事变流器拓扑及波形控制技术、功率因数校正与有源滤波技术、新能源变换与组网技术方面的研究。sxf@ysu.edu.cn

1 并网系统阻抗模型

1.1 电网等效阻抗分析

本文以考虑电网等效阻抗的并网逆变器为例,逆变器通过电缆连接到电网,假设电缆上电感、寄生电容均匀分布,其集总参数模型图 1 所示。

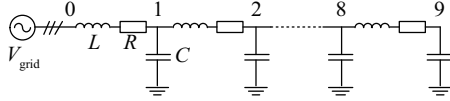


图 1 电缆集总参数模型

Fig. 1 Lumped-parameter model of cable

如图 2 所示,假设传输电缆是无损的,即 $R=0$,总长度为 l ,传输电缆终端接负载阻抗 Z_L ,距离终端 x 处向负载方向看去的传输电缆等效阻抗为式(1)所示,其中 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ 为特性阻抗,传播系数 $\gamma = j\omega\sqrt{LC}$,线路参数如表 1 所示^[8,9]。

$$Z_g(x) = Z_0 \frac{Z_L \cosh(\gamma x) + Z_0 \sinh(\gamma x)}{Z_L \sinh(\gamma x) + Z_0 \cosh(\gamma x)} \quad (1)$$

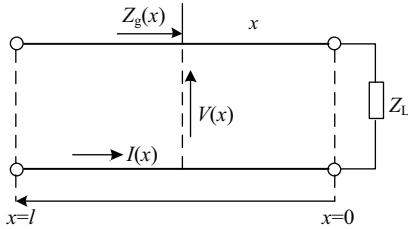


图 2 传输电缆线分布参数模型

Fig. 2 Distributed-parameter model of feeder

表 1 线路参数

Table 1 Circuit parameters

参数	数值	参数	数值
基波频率/Hz	50	线路电容 $C/\text{mF} \cdot \text{km}^{-1}$	25
线路电感 $L/\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$	1.98	线路电阻 $R/\text{W} \cdot \text{km}^{-1}$	0.36

逆变器往电网侧看,逆变器通过传输电缆连到电网,电网等效成电压源,通过叠加定理,电压源表现为短路,则 $Z_L=0$,传输电缆等效阻抗如式(2)所示:

$$Z_g(x) = Z_0 \tanh(\gamma x) \quad (2)$$

由式(2)可得,传输电缆等效阻抗即电网等效阻抗 Z_g 随长度变化关系如图 3 所示。

可知,电缆长度小于 10 km,传输电缆等效阻抗随电缆长度呈正比变化。 X_L 为单位长度电缆的电抗。

$$Z_g = jX_L x \quad (3)$$

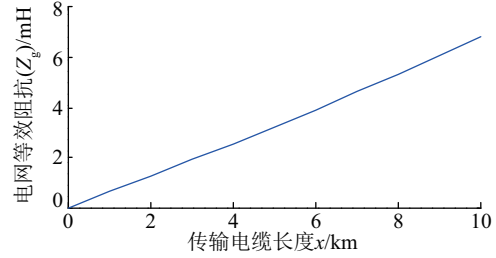


图 3 传输电缆长度为 x 的阻抗波形

Fig. 3 Impedance of cable of length x

1.2 并网逆变器阻抗建模

为增大逆变器阻尼,提高系统稳定性,本文采用电网电流外环,电容电流内环的控制方式。忽略 dq 轴间的耦合,并网逆变器小信号模型如图 4 所示。图中, i 、 i^* 分别为电流反馈值与给定值, V_M 、 V_0 、 V_{pcc} 分别为电流环 PI 调节器输出、逆变器输出电压与 PCC 电压, L_1 、 L_2 分别为 LCL 滤波器的逆变器侧电感和网侧电感, R_1 、 R_2 、 R_d 分别为 LCL 滤波器的逆变器侧电感、网侧电感的等效电阻和 LCL 滤波器的阻尼电阻, C_f 为 LCL 滤波器的电容, G_c 、 G_d 分别为比例调节器和逆变器增益环节; K 为反馈系数。

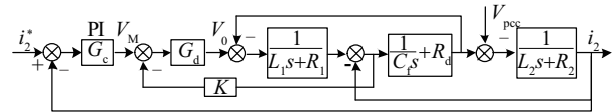


图 4 并网逆变器小信号模型

Fig. 4 Small signal representation of grid inverter

系统的开环传递函数如式(4)所示:

$$T = \frac{G_c G_d Z_{cf}}{Z_{L1} Z_{L2} + Z_{cf} Z_{L1} + Z_{cf} Z_{L2} + K G_d Z_{L2}} \quad (4)$$

式中, Z_{L1} 、 Z_{cf} 、 Z_{L2} ——LCL 滤波器逆变器侧电感 L_1 及其寄生电阻 R_1 的电抗、电容 C_f 及其寄生电阻 R_d 的电抗、电网侧电感 L_2 及其寄生电阻 R_2 的电抗。

闭环传递函数如式(5)所示:

$$G_{cl} = \frac{i_2}{i_2^*} \bigg|_{V_{pcc}=0} = \frac{T}{1+T} = \frac{G_c Z_{cf} G_d}{Z_{cf} Z_{L1} + Z_{L2} Z_{L1} + Z_{cf} Z_{L2} + G_c Z_{L2} G_d + Z_{L2} K G_d} \quad (5)$$

闭环输出导纳如式(6)所示:

$$Y_{CL} = \left. \frac{-i_2}{V_{pec}} \right|_{i_2^* = 0} \quad (6)$$

$$= \frac{Z_{L1} + Z_{CL} + KG_d}{Z_{CL}Z_{L1} + Z_{L1}Z_{L2} + Z_{CL}Z_{L2} + G_cZ_{CL}G_d + Z_{L2}KG_d}$$

电流控制型并网逆变器的闭环诺顿等效模型如图 5 所示。

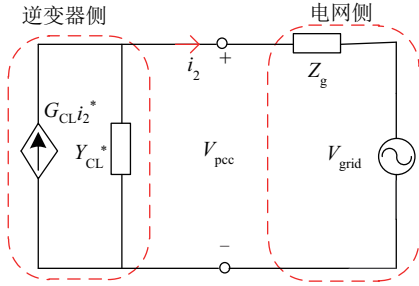


图5 系统的闭环模型

Fig. 5 Closed-loop model of power-electronics-based AC system

针对一个双输入单输出系统,逆变器输出电流 i_2 如式(7)所示,阻抗比 T_m 为小反馈环,如式(8)所示:

$$i_2 = G_{CL} i_2^* - Y_{CL} V_{pec} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{1 + T_m} G_{CL} i_2^* - \frac{T_m}{1 + T_m} \left(\frac{V_{grid}}{Z_g} \right)$$

$$T_m = \frac{Y_{CL}}{Y_{TO}}, Y_{TO} = \frac{1}{Z_g} \quad (8)$$

根据式(4)和式(8),使用阻抗判据^[14], $T_m \ll 1$ 时,在奈奎斯特图中,系统不包围 $(-1, j0)$ 点, T_m 稳定;同时保证 T 稳定,则系统稳定。

1.3 电网等效阻抗与逆变器阻抗比

由公式(8)可得电网等效阻抗和逆变器阻抗比,简称为阻抗比 T_m ,如式(9)所示:

$$T_m = \frac{Z_g}{Z_{CL}} \quad (9)$$

其中, Z_{CL} 是逆变器阻抗,由式(9)可知,若 n 台相同的逆变器并联,则逆变器阻抗变为 Z_{CL}/n , T_m 比值变为 nT_m , T_m 在奈奎斯特图中会逐渐包围 $(-1, j0)$ 点,系统变得不稳定;若单台逆变器并网,改变电网等效阻抗为 nT_m , T_m 比值也会变为 nT_m ,系统变得不稳定。故而,本文使用单台逆变器并网,通过变化电网等效阻抗的方式改变阻抗比,不仅能够模拟不同传输电缆下系统稳定性问题而且能够模拟并联逆变器台数变化对系统稳定性影响。

2 并网系统高频稳定性分析

2.1 高阻抗比对系统稳定性的影响

本文研究的是电流控制逆变器并网,其具体参数如表 2 所示。

表2 并网逆变器系统参数

Table 2 Parameters of grid-connected inverter

系统参数	取值及单位
逆变器侧电感 L_1 及其寄生电阻 R_1	2.8 mH、0.1 Ω
滤波电容 C_f 及其寄生电阻 R_d	50 mF、0.1 Ω
电网侧电感 L_2 及其寄生电阻 R_2	2.5 mH、0.1 Ω
电容电流反馈环增益 K	5
输出电流反馈环比例 K_p	8
输出电流反馈环积分 K_i	747

本文使用阻抗判据^[14]进行稳定性分析,电流环开环 T 的频率响应如图 6 所示。

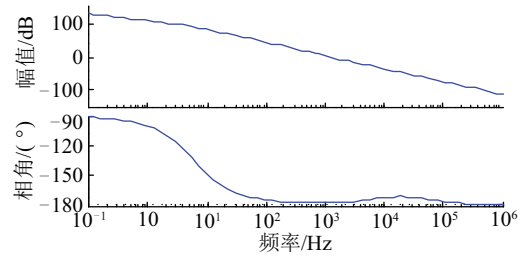


图6 电流环开环增益的频率响应

Fig. 6 Frequency response for open-loop gain of current control loop

电流环开环 T 稳定,则闭环系统在右半平面没有零极点。通过改变电网等效阻抗以改变阻抗比,来模拟不同的电网状态,其 T_m 的奈奎斯特图如图 7 所示。

由图 7 可知, L_g 为电网等效阻抗,当 L_g 为 3 mH 时,小反馈环 T_m 的奈奎斯特图没有穿越 $(-1, j0)$ 点,系统稳定;当 L_g 为 8 mH 时,系统处于临界稳定状态;当 L_g 为 18 mH 时,系统不稳定。

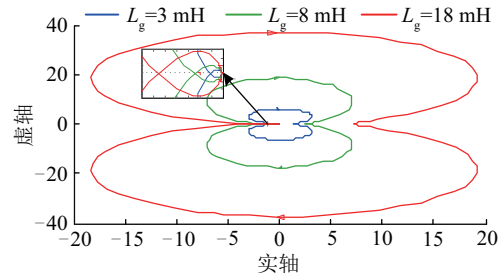


图7 不同的电网等效阻抗下,小反馈环的奈奎斯特图

Fig. 7 Nyquist plots of minor-loop gains derived with different equivalent grid impedance

根据表 2 所给参数进行仿真验证,在不同电网等效阻抗下,输出电流波形仿真结果如图 8 所示。由图 8 可看出,电网等效阻抗为 8 和 18 mH 时,输出电流的谐波含量明显增大,系统不稳定;同时,电网等效阻抗增大即高阻抗比时,系统的谐振频率向低频域移动。

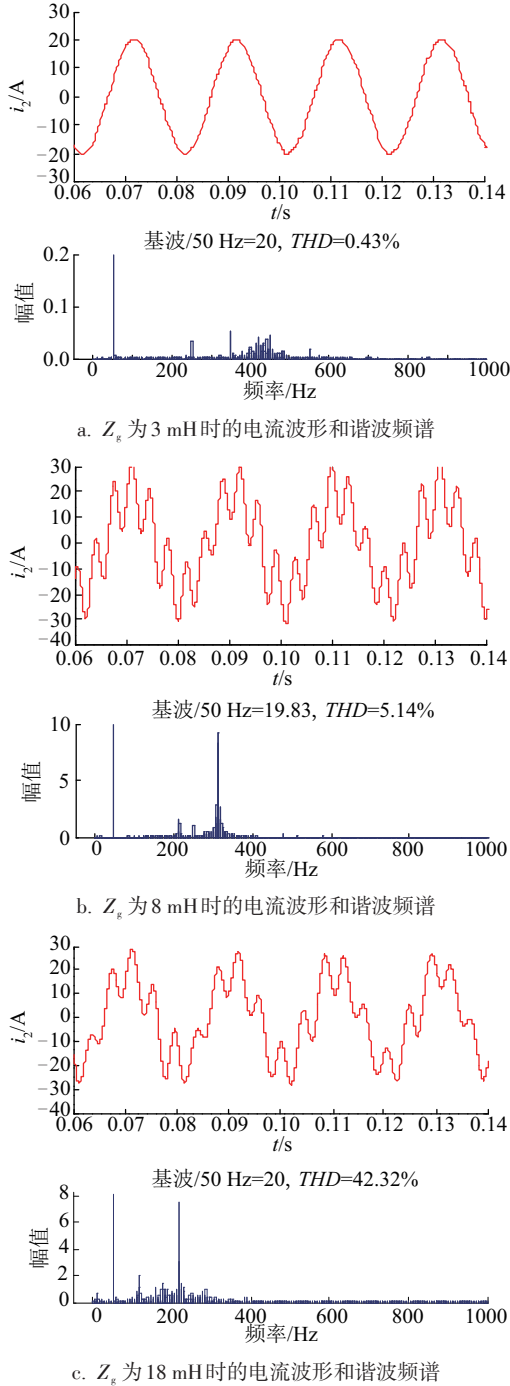


图 8 不同的电网等效阻抗下,输出电流波形和谐波频谱

Fig. 8 Simulated current and associated harmonic spectra under different equivalent grid impedance

2.2 谐波抑制方案及其谐波抑制电阻选择

由式(9)可知,当系统为高阻抗比时,系统会变得不稳定,所以本文通过调整逆变器等效阻抗,使得 $T_m \ll 1$,以达到输出电流和电压谐波含量降低目的,提高系统稳定性。如图 9 所示。图中, V_{grid} 、 V_{dh} 、 V_{qh} 为电网电压、电网电压 d 轴分量和电网电压 q 轴分量, i_c 、 i_{d12} 、 i_{d2f} 、 i_{d2h} 分别为电容电流、逆变器输出谐波电流 d 轴分量、逆变器输出电流 d 轴给定值与谐波电流补偿 d 轴分量, i_{q12} 、 i_{q2h} 、 i_{q2f} 分别为逆变器输出谐波电流 q 轴分量、谐波电流补偿 q 轴分量与逆变器输出电流 q 轴给定值。

由图 9 可知,在 PCC 提取谐波电压 V_h ,通过谐波抑制电阻 R_v 后得到谐波电流 i_{2h} , i_{2h} 与电流基波给定值 i_{2f}^* 之和作为电流控制环参考值。

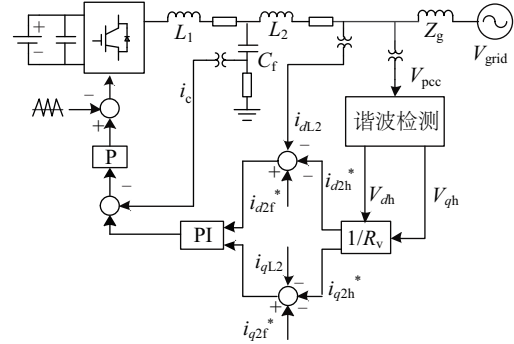


图 9 谐波抑制策略

Fig. 9 Harmonic damping strategy of voltage-source inverter

加入 R_v 能够改变逆变器阻抗,控制系统的运行,此时系统控制框图如图 10 所示。其中谐波提取使用高通滤波器,截止频率为 1 Hz, Z_{cl} 是加入谐波抑制方案后逆变器等效阻抗。

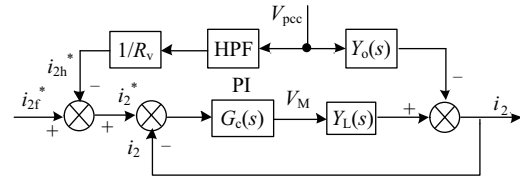


图 10 具有谐波抑制策略的并网逆变器小信号模型

Fig. 10 Small signal representation of the grid inverter with harmonic damping scheme

若只考虑逆变器电压,不考虑电网电压,电网电流到逆变器输出电压传递函数^[11-13]如式(10)所示:

$$Y_L = \frac{i_2}{V_M} \Big|_{V_{pec}=0} \quad (10)$$

$$= \frac{Z_{Cf} G_d}{Z_{Cf} Z_{L1} + Z_{L2} Z_{L1} + Z_{Cf} Z_{L2} + Z_{L2} K G_d}$$

若仅考虑电网电压, 不考虑逆变器电压则开环输出导纳如式(11)所示:

$$Y_o(s) = \frac{-i_2}{V_{pec}} \Big|_{V_M=0} \quad (11)$$

$$= \frac{Z_{L1} + Z_{Cf} + K G_d}{Z_{Cf} Z_{L1} + Z_{L1} Z_{L2} + Z_{Cf} Z_{L2} + Z_{L2} K G_d}$$

V_{pec} 到谐波电流参考值的传递函数如式(12)所示:

$$Y_M(s) = \frac{s}{s + \omega_f} \cdot \frac{1}{R_v} \quad (12)$$

闭环输出导纳:

$$Y_{CL}^* = \frac{-i_2}{V_{pec}} \Big|_{i_{2f}^*=0} = \frac{Y_o + Y_M G_c Y_L}{1 + T} \quad (13)$$

$$= \frac{Z_{L1} + Z_{Cf} + K G_d + Y_M G_c Z_{Cf} G_d}{Z_{Cf} Z_{L1} + Z_{L1} Z_{L2} + Z_{Cf} Z_{L2} + Z_{L2} K G_d + G_c Z_{Cf} G_d}$$

小反馈环 T_m 传递函数:

$$T_m = \frac{Y_{CL}^*}{Y_{TO}} = \frac{Z_g}{Z_{CL}^*} \quad (14)$$

本文以 Z_g 为 18 mH 电感(对应图 1 中 9 km 电缆)为例, 研究系统的稳定性, 不同的谐波抑制电阻 R_v 下, T_m 的奈奎斯特图, 如图 11 所示。由图 11 可看出随着谐波抑制电阻 R_v 的增大, 系统的稳定裕度越来越低。由于电网等效阻抗 Z_g 是由图 1 中电缆的集总参数模型获得, 如果上级电网存在谐波渗透, 图 1 中各个节点电压会存在谐波放大现象, 所以 R_v 的最优取值不仅要通过图 11 的系统稳定性分析, 还要考虑存在上级电网谐波渗透时, 集总参数模型各个节点谐波放大问题。

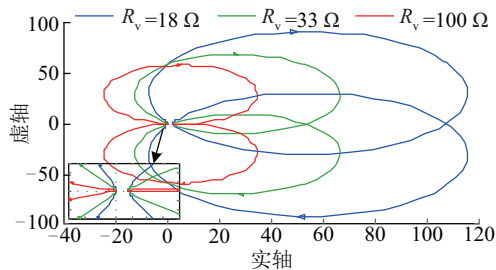
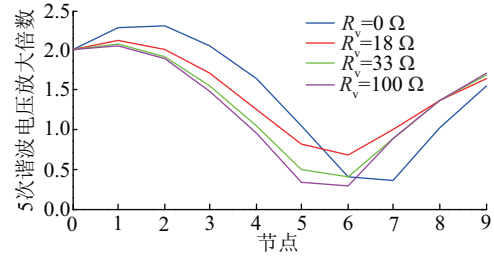


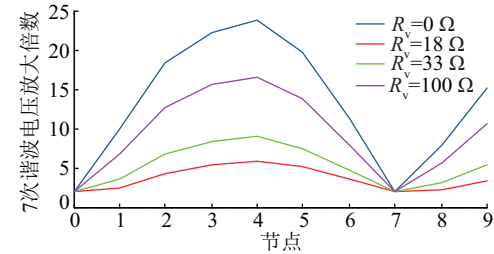
图 11 不同谐波抑制电阻下的小反馈环的奈奎斯特图

Fig. 11 Nyquist plots of minor-loop gains with different damping resistors of harmonics damping

取 Z_g 为 18 mH 电感, 不同谐波抑制电阻 R_v 对应的节点电压谐波放大现象仿真结果如图 12 所示。



a. 5次谐波



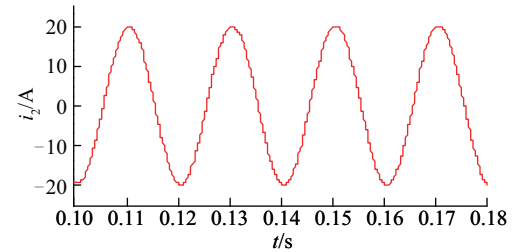
b. 7次谐波

图 12 电缆上谐波电压畸变率仿真结果

Fig. 12 Simulation results of harmonic voltage-distortion rates along cable

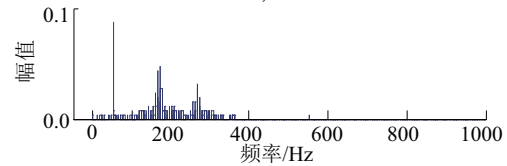
可看出, 当 $R_v = 18 \Omega$ 时, 能够有效抑制电缆上 5 次谐波和 7 次谐波节点放大现象。故选择谐波抑制电阻为 18Ω , 此时逆变器输出电流波形及其谐波含量仿真结果如图 13 所示。

图 13 与图 8c 比较可看出, 取 $R_v = 18 \Omega$ 时, 逆变器输出电流的谐波含量很低, 能够很好的抑制谐波, 系统变得稳定。仿真结果与理论分析一致。



a. 逆变器输出电流波形

基波/50 Hz=20, THD=0.09%



b. 谐波频谱

图 13 输出电流波形和谐波频谱

Fig. 13 Simulated current with harmonic damping scheme and associated harmonic spectra

3 并网系统 PCC 电压超限机理分析

3.1 电压超限原理分析

高阻抗比时, PCC 会出现电压超限的问题, 把逆变器系统等效成一个电压源和滤波器等效阻抗 Z_L 串联, 电网等效为 U_{grid} 和电网等效阻抗串联, 采用相量形式的逆变器并网电路如图 14 所示, 其中以 PCC 电压为参考向量, PCC 电压与电网电压和逆变器电压之间的关系如式(15)所示。图中, U_d 、 U_{inv} 分别为 d 轴电压和逆变器输出电压, I_g 为逆变器并网电流, P_s 、 P_{inv} 分别为 PCC 有功功率和逆变器输出有功功率, Q_s 、 Q_{inv} 分别为 PCC 无功功率和逆变器输出无功功率, S_{pcc} 、 S_{inv} 分别为 PCC 视在功率和逆变器输出视在功率。

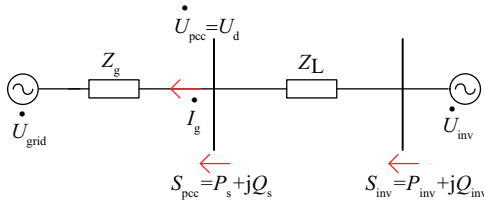


图 14 逆变器并网戴维宁等效电路

Fig. 14 Thevenin equivalent circuit of grid connected inverter

$$\begin{cases} \dot{U}_{pcc} = U_d \\ \dot{U}_{pcc} = \dot{U}_{grid} + \Delta \dot{U} \\ \dot{U}_{pcc} = \dot{U}_{inv} - \Delta \dot{U}_1 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\Delta \dot{U}$ ——PCC 与理想电网之间的电压差;
 $\Delta \dot{U}_1$ ——PCC 与逆变器之间的电压差。

对电网等效阻抗 Z_g 呈现纯感性和阻性占优的阻感性 2 种情况进行原理分析, 如图 15、图 16 所示。

由图 15 可知, 电网等效阻抗为纯电感或感性占优时, 增大电网等效阻抗, PCC 电压会变小, 易超

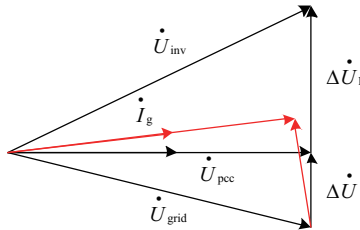


图 15 电网等效阻抗为纯感性时的电压降低相量图

Fig. 15 Phasor diagram of voltage fall when grid equivalent impedance is inductance

出下限; 由图 16 可知, 电网等效阻抗为阻性占优的阻感性时, 增大电网等效阻抗, PCC 电压会变大, 易超出上限。

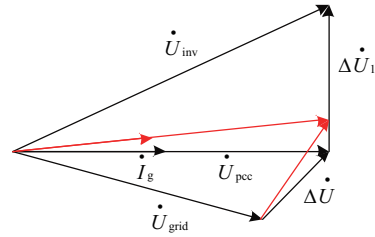
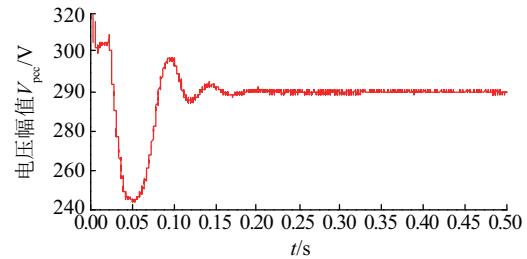


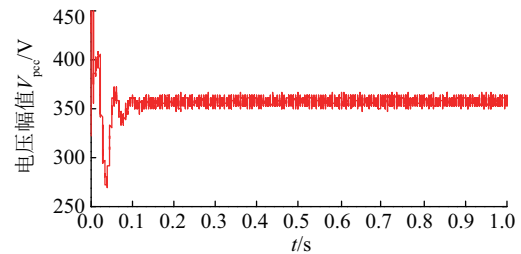
图 16 电网等效阻抗为阻感性时的电压升高相量图

Fig. 16 Phasor diagram of voltage rise when grid equivalent impedance is resistor-inductance

使用谐波抑制方案后, 当电网等效阻抗为 18 mH, 电网等效阻抗为 3.27 Ω 和 18 mH 时, PCC 电压幅值变化仿真结果如图 17 所示。由图 17 可知, 电网等效阻抗为 18 mH 即为纯感性时, PCC 电压跌落至约 290 V; 电网等效阻抗为 3.27 Ω 和 18 mH 即为阻性占优的阻感性时, PCC 电压上升至约 350 V, 图 17 的仿真结果与图 15、图 16 理论结果一致。



a. 电网等效阻抗为 18 mH



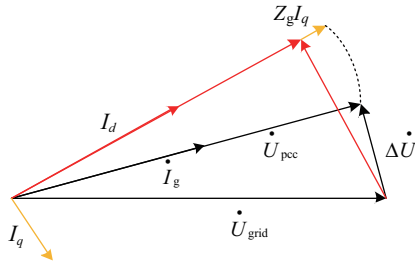
b. 电网等效阻抗 3.27 Ω 和 18 mH

图 17 输出电压有效值波形

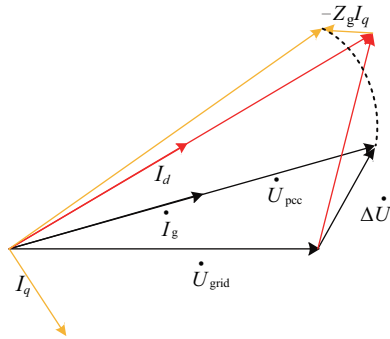
Fig. 17 Simulated rms voltage

3.2 无功控制策略

调节无功能够保持 PCC 电压在允许的偏差之内, 无功的变化对 PCC 电压调整如图 18 所示。



a. 电网等效阻抗是感性



b. 电网等效阻抗是阻感性

图 18 无功电流电压调整相量图

Fig. 18 Phasor diagram of voltage regulation with reactive current

由图 18 可知,电网阻抗呈纯感性,增加无功电流,能够提高 PCC 电压幅值,电网阻抗呈阻性占优的阻感性,减少无功电流,能够降低 PCC 电压幅值。因此提出无功控制策略,如图 19 所示。

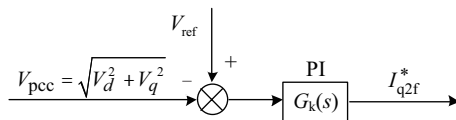


图 19 对 PCC 电压调节的无功控制策略

Fig. 19 Reactive power control strategy for voltage regulation of PCC

由图 19 可看出, PCC 电压低于参考电压时,能够增加无功电流参考值; PCC 电压高于参考电压时,能够降低无功电流参考值。图 9 与图 19 控制策略相结合后(即谐波抑制和无功控制策略相结合)逆变器输出电压仿真波形如图 20 所示。

由图 20 可知,对电网阻抗呈现感性和阻性占优的阻感性 2 种情况使用无功控制策略后, PCC 电压幅值维持在允许范围之内,恒定在 311 V 左右。

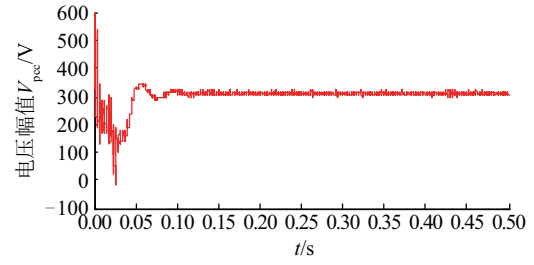


图 20 使用无功控制策略后,输出电压有效值波形

Fig. 20 Simulated rms voltage with reactive control scheme

4 实验验证

为了验证该控制方案的有效性,搭建带 LCL 滤波器的并网逆变器实验平台。该平台中逆变器的控制芯片选用 TI 公司的 DSP TMS320F28335。该系统额定电压幅值为 100 V,频率为 50 Hz。

实验中,系统采用 LCL 滤波器的参数为: $L_1 = 3 \text{ mH}$ 、 $C_f = 14.1 \text{ mF}$ 、 $L_2 = 1.5 \text{ mH}$,该条件下, PCC 电压和逆变器输出电流波形如图 21a 所示。逆变器所接电网等效阻抗为 5.5 mH 和 2 Ω 时, PCC 电压和逆变器输出电流波形如图 21b 所示。其中,电流环 PI 调节器参数为: $K_p = 0.9$, $K_i = 0.083$ 。

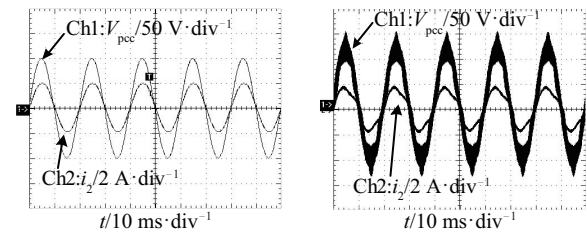
a. Z_g 为 0 mHb. Z_g 为 5.5 mH 和 2 Ω

图 21 逆变器输出电压及输出电流

Fig. 21 Output voltage and output current of two inverters

从图 21 中可知, Z_g 为 0 mH 时,逆变器能够很好的并网运行,输出电压和电流波形没有谐波;加入 5.5 mH 和 2 Ω 的电网等效阻抗后,逆变器输出电压和电流波形明显发生畸变,电流和电压存在谐波,系统变得不稳定,同时 PCC 电压幅值明显上升出现了图 16 的现象。

对图 21b 采用谐波抑制和无功控制结合的控制方式,其中 $R_s = 0.0728 \Omega$,无功控制的 PI 调节器比例和积分环节分别为: $K_{pq} = 0.05$ 、 $K_{iq} = 10$,该条件下, PCC 电压和逆变器输出电流波形如图 22 所示。

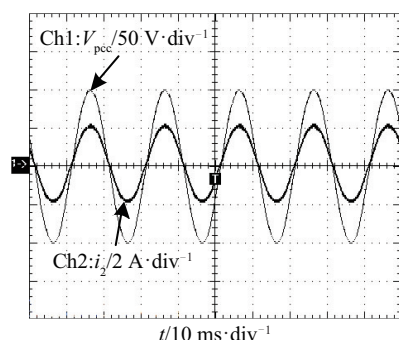


图 22 逆变器输出电压及输出电流

Fig. 22 Output voltage and output current of two inverters

通过图 22 看出 PCC 电压和逆变器输出电流的谐波得到抑制,同时 PCC 电压幅值明显下降。

通过实验结果可看出,采用谐波抑制和无功控制相结合的控制方案不仅能提高系统稳定性,并且可保证 PCC 电压维持在允许的范围之内。

5 结 论

本文以电流控制逆变器并网系统为研究对象,考虑高阻抗比对系统稳定性和 PCC 电压幅值的影响,提出谐波抑制和无功控制方案相结合的双重控制策略。文中把电网等效阻抗与传输电缆理论相结合,通过分析各个节点谐波放大现象,确定谐波抑制方案参数的最优取值;同时,针对电网等效阻抗呈感性和阻性占优的阻感性 2 种情况,分别对高阻抗比下,PCC 电压幅值变化进行分析,提出调节无功电流的无功控制方案解决 PCC 电压超限的问题。通过进行双重控制策略可使系统在高阻抗比下保持稳定的同时维持 PCC 电压在允许偏差之内,有效地提高系统的电能质量。

[参考文献]

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵 勇.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100—107.
- [1] Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100—107.
- [2] 陆晓楠,孙 凯,黄立培.微电网系统中并联 LCL 滤波器谐振特性[J].清华大学学报:自然科学版,2012,52(11):1571—1577.
- [2] Lu Xiaonan, Sun Kai, Huang Lipei. Resonance characteristics in a parallel LCL filter system for microgrid application [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2012, 52 (11) : 1571—1577.
- [3] Liserre M, Teodorescu R, Blaabjerg F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21 (1) : 263—272.
- [4] 杨 明,周 林,张东霞,等.考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J].电工技术学报,2013,28(9):56—63.
- [4] Yang Ming, Zhou Lin, Zhang Dongxia, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic power plants for the effect of grid impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 56—63.
- [5] Wang X F, Blaabjerg F, Loh P C. Grid- current-feedback active damping for LCL resonance in grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (1) : 213—223.
- [6] Wang X F, Blaabjerg F, Liserre M, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3318—3329.
- [7] Wada K, Fujita H, Akagi H. Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(4): 1123—1130.
- [8] Akagi H, Fujita H, Wada K. A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(3): 638—645.
- [9] Zhang Shao, Jiang Shuai, Lu Xi, et al. Resonance issues and damping techniques for grid-connected inverters with long transmission cable [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (1) : 110—120.
- [10] Wang Xiongfei, Blaabjerg F, Chen Zhe. Synthesis of variable harmonic impedance in inverter- interfaced distributed generation unit for harmonic damping throughout a distribution network [A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE [C], Orlando, FL, USA, 2012: 775—782.
- [11] Wang Xiongfei, Blaabjerg F, Liserre M. An active damper to suppress multiple resonances with unknown

- frequencies [A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE [C], Fort Worth, Texas, USA, 2014: 2184—2191.
- [12] 孙 凯, 左 峰, 陆晓楠, 等. 适用于微电网的并网逆变器动态电压支持功能研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 1—5.
- [12] Sun Kai, Zuo Feng, Lu Xiaonan, et al. Dynamic voltage support function of grid-connected inverters for micro-grids [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2): 1—5.
- [13] 黄亚峰, 于 洋, 严干贵, 等. 光伏逆变器无功调节能力分析与控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(8): 88—93.
- [13] Huang Yafeng, Yu Yang, Yan Gangui, et al. Reactive power regulation analysis and control strategy studies on grid-connected photovoltaic inverters [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 28(8): 88—93.
- [14] Sun Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075—3078.

HARMONIC SUPPRESSION AND REACTIVE POWER CONTROL STRATEGY FOR GRID CONNECTED SYSTEM BASED ON HIGH IMPEDANCE RATIO

Li Xin, Ma Qun, Qi Lei, Sun Xiaofeng

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to enhance the stability of the inverter system and ensure the voltage amplitude of common coupling point within allowable range, considering the influence of parasitic capacitance and characteristics of transmission cable, a dual control strategy combining the harmonic suppression scheme and reactive power control strategy is proposed. Simultaneously, the optimal values of dual control strategy parameters are determined combining with the suppression of background harmonic amplification on the cable to realize the stable operation of system. The simulation and experiment results verify the feasibility and correctness of the dual control strategy.

Keywords: transmission line; harmonic distortion; harmonic suppression; stability