

Research on Minimize the Current Transient for Mode-Switching of Dual-mode Inverter

Xiaohuan Wang, Chunjiang Zhang

Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, China

Email: fjzwxh@ysu.edu.cn

Abstract: To minimize the impact on power grid and load during the mode-switching of dual-mode inverter, the time-domain analysis on response of power grid current and the load voltage from the transient circuit is proposed. Based on Kirchhoff's law and characteristics of circuit components, the differential equation for the switching mode is built and the expressions of transient variables are derived. The characteristically relation among the moment of the switching, phase and transient components are researched. According to the relation among variables during the transient process, it is proposed to adopt effective measures to eliminate transient variables to attain the smooth transition of switching process and realize seamless switching. Simulation and experiment results verify the correctness and feasibility of the proposed method.

Keywords: distributed generation (DG); Mode-switching; minimize the current transient; transient analysis; differential equations

单相逆变器并/脱网模式切换冲击抑制方法的研究

王晓寰, 张纯江

燕山大学电气工程学院, 秦皇岛, 中国, 066004

Email: fjzwxh@ysu.edu.cn

摘要: 为减小单相逆变器并/脱网过程对电网和本地负载的冲击, 提出从时域角度对并/脱网暂态电路的并网电流和负载电压响应进行分析。应用电路分析原理中的基本方法, 建立了并/脱网切换电路微分方程, 推导了暂态变量表达式, 探讨了并网时刻、相位与暂态分量、直流分量的特征关系。依据暂态过程中系统各变量之间的函数关系, 采取有效措施抑制直流分量和暂态分量, 以获得切换过程的平滑过渡, 实现无缝切换。仿真结果和实验验证了该方法的正确性和可行性。

关键词: 分布式发电; 模式切换; 抑制冲击; 暂态分析; 微分方程

1 引言

能源和环境已经成为 21 世纪人类面临的重大基本问题。清洁、可再生能源的发展和越来越受到世界各国的广泛关注^[1-3]。基于可再生能源的分布式并网发电技术已成为人类能源可持续发展战略的重要组成部分^[4-7]。分布式发电系统与电网接口通常采用逆变器, 其控制系统的设计直接影响整个系统的性能^[8]。因此, 研究并网逆变器控制具有重要现实意义。

敏感负载对不间断电力供给的要求, 微电网理论的提出, 为能够运行于独立、并网两种模式^[9-10]的并网逆变器提供了更为广阔的发展空间。如何获得切换冲击最小的控制模式切换达到无缝切换是双模运行分布式发

电的关键技术。传统的无缝切换控制策略单纯从控制算法出发, 研究减小切换电流电压冲击的方法, 均未以电路为基础分析寻找切换过程中引起电流电压变化的根本原因及影响因素。

本文以单相并网逆变器为主电路, 分析独立与并网双模式下的无缝切换控制技术。应用电路分析原理中的基本方法, 归纳不同时刻下切换暂态变量的微分方程。从时域角度分析系统暂态变量对电网或负载的影响, 提取微分方程暂态变量的特征, 并给出实现无缝切换的控制策略的理论基础。最后, 搭建了试验平台, 验证了方法的有效性。

2 系统拓扑结构

本文采用传统单相逆变器电路, 前级直流电压由光

资助信息: 国家自然科学基金项目(基于可再生能源的分布式发电系统能量变换、控制与并网运行 50837003)

光伏发电系统提供。根据理论分析，电路中选用 LCL 型滤波器。逆变器并网时，LCL 滤波器能保证高质量的并网电流；独立运行时，为保证敏感负载电压稳定，本地负载接在 LCL 滤波器的电容两端，相当于传统的 LC 滤波器，系统拓扑如图 1 所示。

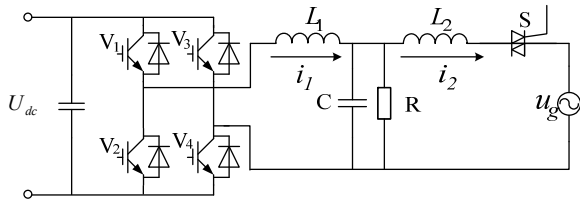


Figure. 1 Topology of single-phase grid-connected inverter

图 1 单相逆变器并网拓扑

3 模式切换暂态分析

3.1 独立运行模式电路分析

并网前逆变器工作于独立模式向本地负载供电，并网开关 S 断开，逆变器输出的脉宽调制(pulse width modulation, PWM)波形中含有基波和谐波分量，本文以基波分量为例进行分析，将逆变桥等效为交流电压源，等效电路如图 2 所示。

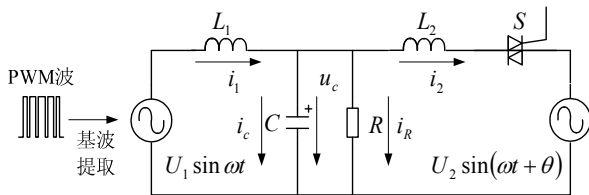


Figure. 2 Equivalent circuit of the stand-alone mode

图 2 逆变器独立模式运行等效电路

根据基尔霍夫定律得到电路的微分方程为

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + u_c = U_1 \sin \omega t \\ C \frac{du_c}{dt} = i_c \\ \frac{u_c}{R} = i_R \\ i_1 = i_c + i_R \end{cases} \quad (1)$$

整理后可得

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{L_1 C} u_c = \frac{1}{L_1 C} U_1 \sin \omega t \quad (2)$$

上述微分方程的解为

$$u_c = A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t + e^{\alpha t} (C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t) \quad (3)$$

式中

$$\alpha_1 = -\frac{1}{2RC}, \quad \beta_1 = \frac{\sqrt{4R^2 L_1 C - L_1^2}}{2RCL_1}$$

$$A_1 = \frac{U_1 R^2 (1 - \omega^2 L_1 C)}{R^2 (1 - \omega^2 L_1 C)^2 + (\omega L_1)^2}$$

$$B_1 = \frac{-U_1 R \omega L_1}{R^2 (1 - \omega^2 L_1 C)^2 + (\omega L_1)^2}$$

当独立模式达到稳态时，并网切换才会开始，暂态部分表达式为 0，稳态表达式为独立模式向并网模式切换中微分方程的变量提供初始值。

3.2 独立模式向并网模式切换电路分析

独立模式向并网模式切换的等效电路如图 2 开关 S 闭合^[15]。根据图 2 建立如下关于 u_c 的微分方程：

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{du_c}{dt} + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} u_c = \frac{U_1 \sin \omega t}{L_1 C} + \frac{U_2 \sin(\omega t + \theta)}{L_2 C} \quad (4)$$

式(4)的解为

$$u_c = A_2 \sin \omega t + B_2 \cos \omega t + e^{\alpha_2 t} (C_3 \cos \beta_2 t + C_4 \sin \beta_2 t) \quad (5)$$

式中

$$\alpha_2 = -\frac{1}{2RC}, \quad \beta_2 = \frac{\sqrt{4R^2 CL_1 L_2 (L_1 + L_2) - L_1^2 L_2^2}}{2L_1 L_2 RC}$$

$$A_2 = \frac{U_2 \sin \theta \omega L_1^2 L_2 R}{R^2 (L_1 + L_2 - \omega^2 L_1 L_2 C)^2 + (\omega L_1 L_2)^2}$$

$$\dots + \frac{R^2 (L_1 + L_2 - \omega^2 L_1 L_2 C) (U_1 L_2 + U_2 L_1 \cos \theta)}{R^2 (L_1 + L_2 - \omega^2 L_1 L_2 C)^2 + (\omega L_1 L_2)^2}$$

$$B_2 = \frac{U_2 \sin \theta R^2 L_1 (L_1 + L_2 - \omega^2 L_1 L_2 C)}{R^2 (L_1 + L_2 - \omega^2 L_1 L_2 C)^2 + (\omega L_1 L_2)^2}$$

$$\dots - \frac{R \omega L_1 L_2 (U_1 L_2 + U_2 L_1 \cos \theta)}{R^2 (L_1 + L_2 - \omega^2 L_1 L_2 C)^2 + (\omega L_1 L_2)^2}$$

假设 t=0 时刻开始模式转换，则表达式中

$$C_3 = \frac{-\omega L_1 U_1}{R^2(1-\omega^2 L_1 C)^2 + (\omega L_1)^2} - B_2$$

$$C_4 = \frac{1}{\beta_2} \left[\frac{\omega U_1 R^2 (1-\omega^2 L_1 C)}{R^2(1-\omega^2 L_1 C)^2 + (\omega L_1)^2} - A_2 \omega - \alpha_2 C_3 \right]$$

由式(5)可知,本地负载电压在切换瞬间的暂态分量为按指数规律衰减的正弦量,在 0-时刻,其幅值为 $\sqrt{C_3^2 + C_4^2}$, 因此若要在切换瞬间使本地负载所受的电压冲击较小,就应该改变 U_1 、 U_2 、 θ 使其幅值最小。

3.3 并网电流微分方程

根据图 3,进网电流 i_2 的微分方程为

$$L_1 L_2 C \frac{d^3 i_2}{dt^3} + \frac{L_1 L_2}{R} \frac{d^2 i_2}{dt^2} + (L_1 + L_2) \frac{di_2}{dt} = U_1 \sin(\omega t + \theta) - U_2 \sin(\omega t + \theta) - \frac{L_1}{R} \frac{dU_2 \sin(\omega t + \theta)}{dt} - L_1 C \frac{d^2 U_2 \sin(\omega t + \theta)}{dt^2} \quad (6)$$

进网电流的微分方程为 3 阶微分方程,其解为

$$i_2 = D + i_{2\infty} + i'$$

D 为直流分量, $i_{2\infty}$ 为稳态分量, i' 是暂态分量。

$$D = \frac{1}{L_2} \left(\frac{A_2 - U_2 \cos \theta}{\omega} + \frac{\beta_2 C_1 - \alpha_2 C_2}{\alpha_2^2 + \beta_2^2} \right)$$

$$i_{2\infty} = \frac{-A_2 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t + U_2 \cos(\omega t + \theta)}{\omega L_2}$$

$$i' = \frac{(\alpha_2 C_4 + \beta_2 C_3) e^{\alpha_2 t} \sin \beta_2 t + (\alpha_2 C_3 - \beta_2 C_4) e^{\alpha_2 t} \cos \beta_2 t}{\omega L_2 (\alpha_2^2 + \beta_2^2)}$$

分析进网电流解的形式,进网电流由直流成分、暂态分量和稳态分量 3 部分组成。要使独立模式向并网模式平滑切换,就应尽量使进网电流中的直流分量为 0,使暂态分量的幅值接近 0,使稳态分量的相位与电网电压的相位一致。通过分析发现,稳态并网电流的幅值与平滑切换存在一定的关系,电路拓扑固定后,最佳切换状态对应一个或若干个进网电流的幅值。如果并网控制时根据公式计算稳态分量 $i_{2\infty}$ 使入网电流幅值与其相等,则可实现无冲击的无缝切换。

3.4 并网模式向独立模式切换控制分析

逆变器并/脱网模式电路的分析是一对逆过程,由于篇幅问题,本文简略了脱网过程系统的电路分析。

在脱网过程中,实际电路中并网开关的延迟动作,会短时出现逆变器已采用电压型模式独立运行工作模式而并网开关未完全关断的情况,造成电流电压冲击。本论文提出一种加权电流控制算法以实现无冲击的平滑切换。传统的控制算法为加快暂态切换,在脱网时给定并网电流为零,加速并网开关的关断,但是无法解决负载端电压的稳定。本文提出了加权电流控制算法解决脱网过程中并网电流和负载电压不稳定的问题,真正实现了无缝切换。系统控制框图如图 3 所示。

在脱网过程中出现的电压型并网模式中,加入电流加权控制,增加了并网电流控制环节。在软件切换的同时加入电流加权控制环,使得切换过程并网电流可控。其中电网电流给定为零,加速并网开关的关断,同时电压控制环保证了负载电压的稳定性。

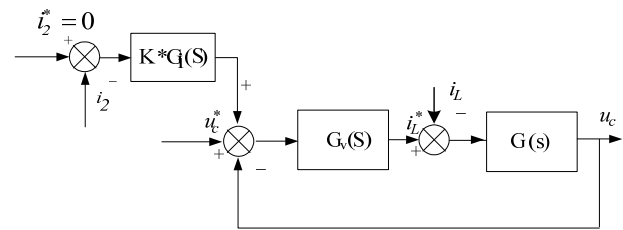


Figure.3 Control diagram of weighted-current control method

图 3 加权电流控制脱网模式切换控制图

4 仿真与实验

综上分析,本文用 Matlab 进行系统仿真。IEEE Std.929-2000 规定直流注入必须小于系统额定电流的 0.5%。为保证进网电流无直流分量,逆变器输出电压幅值、相位与电网电压保持一致,以使进网电流的暂态分量最小。图 4 为并网电流直流分量与角度 θ 的关系。

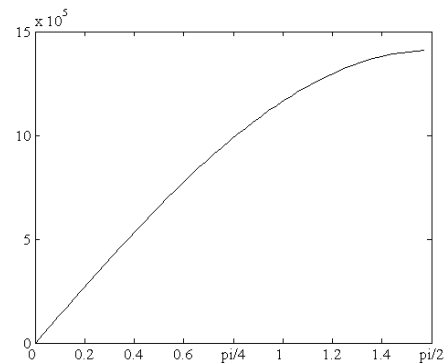


Figure. 4 Relationship between DC components and θ

图 4 并网直流分量与 θ 的关系

由于逆变器侧实际为 PWM 脉冲形式, 进行研究时将其等效为基波成分的交流电源。根据电路叠加原理, 可将谐波对电路的影响用相同的暂态分析法进行推导, 然后再与基波分量分析结果叠加即可。

脱网过程假设并网开关延迟 0.001s 断开。与未加控制算法的仿真图 5 对比, 采用加权电流控制方法的仿真波形如图 6 所示, 电流超调明显减小。

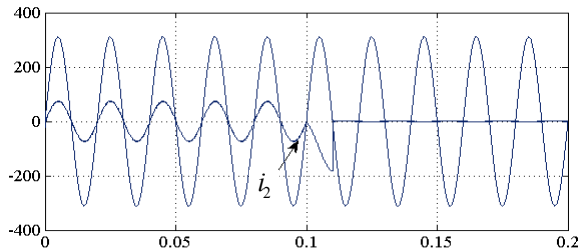


Figure.5 Grid-current waveform without weighted-current control

图 5 未加控制算法的脱网电流

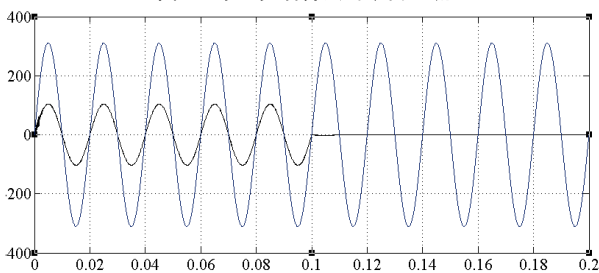
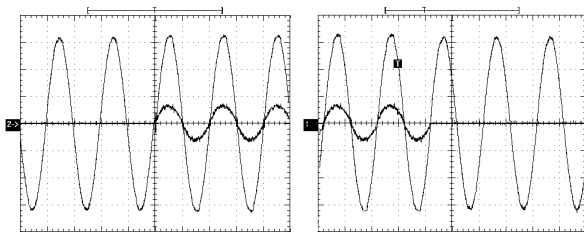


Figure. 6 Grid-current waveform with weighted-current control

图 6 加入控制算法的脱网电流

搭建了实验平台, 根据理论分析选取参数, 并计算了并网电流幅值为 6.1A, 实验波形如图 7 所示。



$u: 100 \text{ V/div}; i: 5 \text{ A/div}; t: 10 \text{ ms/div}$

(a) 独立到并网 (b) 并网到独立

(a) stand-alone to grid-connected (b) grid-connected to stand-alone

图 7 切换过渡过程的负载电压和电网电流

Figure.7 Load voltage and grid current during transition

5 结论

(1)在并/脱网切换暂态过程中, 电路变化会引起进网电流和本地负载电压等变量出现暂态分量, 甚至发生幅值突变, 这对电网和负载, 以及逆变器均存在负面影响。

(2)由时域分析结果可知, 并网切换过程的入网电流由直流分量、暂态分量和稳态分量 3 部分组成。暂态分量的计算为并网电流幅值选取提供依据。

(3)应合理设计电路参数, 依据推导的理论公式采取相应的措施可以在一定范围内消除入网电流的直流分量, 有效抑制暂态分量, 实现无缝切换。

致谢

感谢国家自然科学基金项目(基于可再生能源的分布式发电系统能量变换、控制与并网运行 50837003)对本论文的支持。

References (参考文献)

- [1] Ackerman T, Anderson G, Seder L. Distributed generation: a definition[J]. Electric Power System Research, 2001, 57(6): 195-204.
- [2] Gu Herong, Yang Zilong, Wang Deyu, et al. Research on control method of double-mode inverter with grid-connection and stand-alone[C]. IEEE IPEDM'2006, Shanghai, 2006.
- [3] Liu Yanghua, Wu Zhengqiu, Tu Youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 70-76. 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 70-76.
- [4] Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7. 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
- [5] Li Bin, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88. 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.
- [6] Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18. 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.
- [7] Hu Xuehao. Problems on distributed-generation resources and its networking[J]. Technology Electrotechnical Journal, 2004(10): 1-5. 胡学浩. 分布式发电(电源)技术及其并网问题[J]. 电工技术杂志, 2004(10): 1-5.