

基于 LC 滤波并网逆变器的电流跟踪型控制策略

在并网逆变器系统中, LC 滤波器已经得到了广泛的应用。与传统的单 L 滤波器相比, LC 滤波器具有更优的滤波性能, 对高次谐波具有良好的衰减作用。在 LC 滤波器的基础上, 提出网侧逆变器采用电流跟踪型控制策略, 使得电压电流具有很好的跟踪性能, 实现了系统良好的动态响应性能。并推导出电流跟踪型控制策略下系统的传递函数, 进一步分析基于 LC 滤波系统的稳定性。最后, 通过 Matlab/Simulink 软件进行仿真分析, 有效地验证了该控制策略的可行性和准确性。

谢永流¹ 程志江¹ 李永东^{1,2} 胡 衡¹ 华 东¹ / 1. 新疆大学电气工程学院 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系



谢永流/硕士研究生

关键词/Keywords

并网逆变器 ·
LC 滤波器 ·
电流跟踪 ·
系统稳定性 ·

随着全世界能源需求的不断增加, 传统的化石能源却日益枯竭。火电、水电和核电等大型发电厂的建设对生态环境造成了严重破坏, 环境危机正日益突出, 清洁能源发电在全世界范围受到了广泛的关注^[1], 因此, 分布式发电并网技术也成为当今一个重要的研究课题。并网逆变器作为分布式发电系统的核心部分, 比如光伏电池、燃料蓄电池以及中小型风力发电等都需要采用并网逆变器与外部大电网进行连接。传统的并网逆变器通常采用脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 技术中的电流源控制^[2], 从而导致入网电流中含有大量的高次谐波进入电网, 对电网造成巨大的扰动。因此, 并网逆变器必须具备极高的输出功率因数 (Power Factor, PF), 以及符合国家标准 (GB/T 14549—1993) 的输出电流总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 小于 5% 的要求, 以减小无功功率、谐

波等因素对公共电网 (PCC) 造成的危害^[3]。

有文献提出, 采用单 L 型滤波能够有效地使并网逆变器与外电网进行连接, 其结构简单, 成本低, 易于滤波器的设计, 但是当逆变器工作在独立运行状态的轻载或者空载时, 逆变器输出电压波形谐波含量较大, 无法满足微电网独立运行时负载对于电压谐波含量的要求。文献^[4]提出了采用 LCL 型滤波器来有效抑制电流高次谐波, 并降低总电感量。同时, LCL 型滤波器中的网侧电感与呈感性的电网阻抗相串联, 当电网阻抗发生变化时, 能够减小其变化对系统控制的影响。但是, LCL 型滤波器是一个三阶的系统, 具有一个阻尼系数很低的谐振峰, 容易发生振荡并造成系统的不稳定性。

基于上述所提到的单 L 型、LCL 型滤波器的缺点, 本文提出一种基于 LC 型滤波器的并网逆变器的电流跟踪型控制策略^[5], 并推导该控制策略下的系统传递函数, 分析系统的稳定性能。为了保证电网电能质量, 有必要抑制并网逆变器侧输出电流的谐波含量。因此, 本文还使用了 FFT 进行入网电流谐波分析。最后, 通过 Matlab 软件中的 Simulink 仿真分析, 有效地验证该控制策略的可行性与准确性。

并网逆变器的数学模型

1. 主电路的拓扑结构

本文对基于 LC 滤波器的电流跟踪型并网逆变器的控制策略进行研究, 三相并网发电系统的拓扑结构如图 1 所示。该系统由直流稳压电源 u_{dc} 、三相逆变桥、三相 LC

新疆研究生科研创新项目 (XJGR12014028)。

滤波器以及电网构成。其中, 逆变侧电感 L_f 和网侧滤波电容 C_f 组成了二阶 LC 滤波器, $VT_1 \sim VT_6$ 为三相逆变桥的六个 IGBT 开关管。

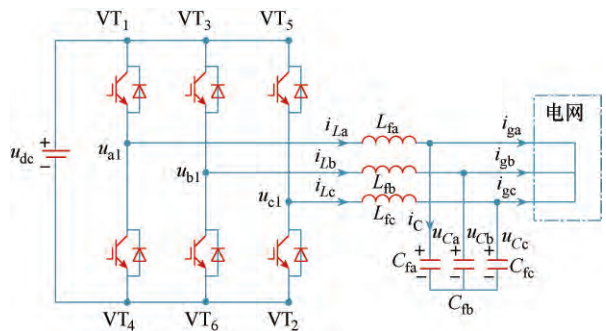


图1 三相并网发电系统的拓扑结构

图1 中, u_{a1} 、 u_{b1} 和 u_{c1} 为逆变器桥臂中点电压; u_{Ca} 、 u_{Cb} 和 u_{Cc} 为滤波电容上的电压; i_{La} 、 i_{Lb} 和 i_{Lc} 为滤波电感上的电流, i_{Ga} 、 i_{Gb} 和 i_{Gc} 为网侧电流; i_C 为滤波电容电流。

2. 并网逆变器 $d-q$ 轴下的数学模型

采用电流的矢量控制来对有功和无功电流进行解耦控制, 通常在同步旋转 $d-q$ 坐标系下进行, 因为此时控制量都将变成直流量。假设三相电网电压是稳定对称, 选取逆变器侧电流、入网电流以及电压为状态量, 可得出并网逆变器系统的状态方程, 如式 (1) 所示。逆变器在 abc 坐标系下逆变器的数学模型为

$$L_f \begin{bmatrix} \frac{di_{aL}}{dt} \\ \frac{di_{bL}}{dt} \\ \frac{di_{cL}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{b1} \\ u_{c1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} C_f \begin{bmatrix} \frac{du_a}{dt} \\ \frac{du_b}{dt} \\ \frac{du_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{aL} \\ i_{bL} \\ i_{cL} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

逆变器的控制策略分析

1. 电流跟踪型控制策略

根据逆变器的数学模型, LC 滤波器在空载的情况下忽略了交叉耦合项 Li_d 、 Li_q 和逆变器机端电压 u_d 、 u_q 后, 桥臂输出电势 $E_d(s)$ 和 $E_q(s)$ 到逆变器电感电流 $I_d(s)$ 、 $I_q(s)$ 的开环传递函数为

$$\frac{I_d(s)}{E_d(s)} = \frac{I_q(s)}{E_q(s)} = \frac{1}{s^2 L_g C_g + 1} \quad (2)$$

为了消除对控制性能带来的不良影响, 在控制器中加入扰动补偿项。基于同步旋转 $d-q$ 坐标

系下的电流矢量控制框图如图2所示, 其中, 电流调节器采用 PI 调节器, 属于线性控制; 在 d 轴下完整的电流闭环框图如图3所示。

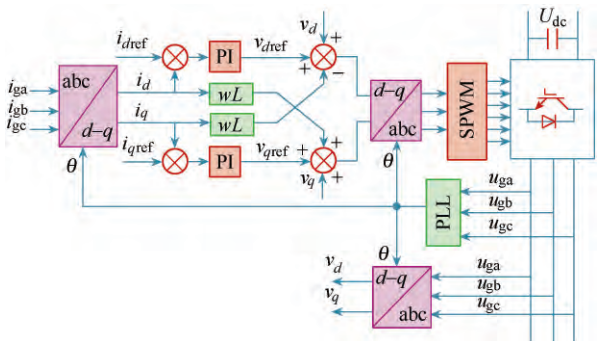


图2 电流跟踪型控制策略框图

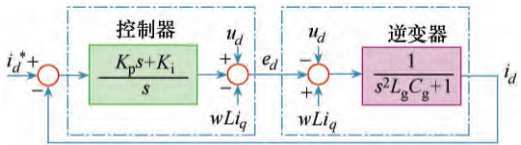


图3 d 轴电流闭环框图

2. 系统的参数设计与稳定性分析

有文献提出并网逆变器的 PI 参数的整定方法, 认为 PI 调节器的零点 K_i/K_p 应与被控对象的极点 $-R/L$ 对消, 系统只有 $-K_p/L$ 一个闭环极点, 其响应是一阶的, 响应时间为 $(3 \sim 5) L/K_p$ 。以 $L=5 \text{ mH}$, $R=0.2 \Omega$ 为例, 若要求响应时间为 1 ms , 则 $K_p=25$, $K_i=100$ 。

在零极点对消的基础上进一步考虑实际数字控制系统中由采样及开关控制导致的延时 T_D , 在环路中加入延时环节 $1/(T_{DS}+1)$ 以使分析更贴近实际情况, 如图4所示, 其开环传递函数如式 (3), 响应是二阶的。由式 (3) 可见, 它是典型的 I 型系统, 可以按二阶最优模型设计 PI 参数。二阶最优模型如式 (4), 阻尼比 $\xi=0.707$ 。

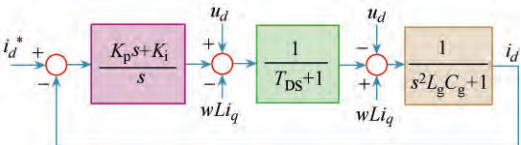


图4 延时的 d 轴电流控制框图

$$F_0(s) = \frac{K_p/L}{s(T_{DS}+1)} \quad (3)$$

$$\omega(s) = \frac{K}{s(T_s+1)}, KT=0.5 \quad (4)$$

设开关频率为 $f_s=10 \text{ kHz}$, 可以估计式 (4)

中 $T = T_D = (0.5 \sim 5) T_s = (50 \sim 500) \mu s$, $K = (1 \sim 10) \times 10^3$ 。逆变器参数可以通过计算得到 $K_p = KL = 5 \sim 50$, $K_i = K_p R/L = 200 \sim 2\,000$ 。

系统仿真与分析

基于 LC 滤波器的并网逆变器系统的结构、控制策略研究如上文所述，系统仿真使用 Matlab/Simulink 软件。仿真参数如下表所示。

表 $d-q$ 坐标系下电流跟踪控制仿真参数

参数	数值	参数	数值
逆变器侧电感 L/mH	5.0	锁相环 $K_{p\text{PLL}}$	4.0
网侧电容 μf	20	锁相环 $K_{i\text{PLL}}$	300
开关频率 kHz	10	电流环调节器 K_{pi}	500
直流母线电压 U_{DC}/V	200	电流环调节器 K_{ii}	2\,000
电网线电压 U_{line}/V	35	有功电流给定值 i_d^*/A	6.0
电网频率 f_0/Hz	50	无功电流给定值 i_q^*/A	0

1. 系统稳态仿真

为实现单位功率因数为 1 的逆变，首先给定设为 $i_d^* = 6\text{ A}$, $i_q^* = 0\text{ A}$ 。稳定运行后， $d-q$ 轴下的稳态电流如图 5 所示，稳态下电流跟踪电压波形如图 6 所示，有功、无功功率如图 7 所示。

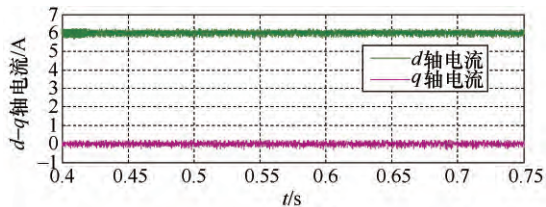


图 5 $d-q$ 轴电流

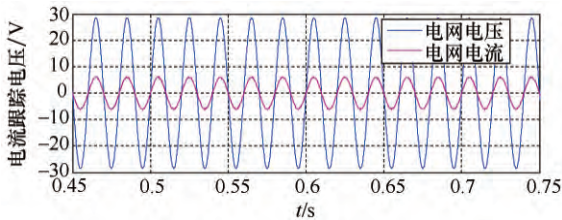


图 6 电压电流跟踪

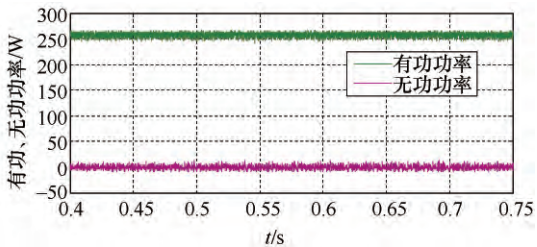


图 7 有功、无功功率

从图 6 的仿真波形图中可以看出，a 相电压和电流同相位，电流波形正弦性好，谐波含量少，能够实现功率因数接近为 1 的逆变；由图 7 可以看出，功率波动小，静态性能好。

2. 动态仿真与分析

仿真中， $t = 0.5\text{ s}$ 时刻 d 轴电流给定值 i_d^* 从 3 A 阶跃至 6 A，开始向电网输送有功功率。仿真结果如图 8 ~ 图 11 所示。其中，图 8 为电网电流，可见波形正弦；图 9 为电压电流跟踪，可见电压电流同相位，功率因数接近 1，电流纹波少；图 10 为 $d-q$ 轴的电流阶跃响应；图 11 为有功、无功输出波形， d 轴电流在 5 ms 内达到给定值的 95% 以上，动态响应快且无超调；图 12 为输出电流的谐波分析，谐波基本分布在整数倍开关频率附近。

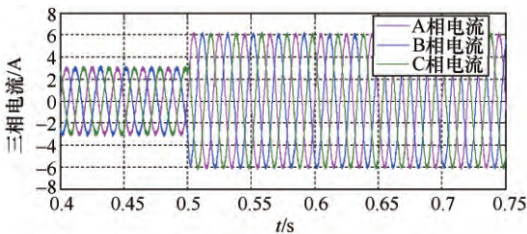


图 8 网侧三相电流

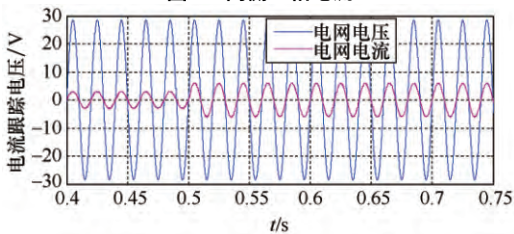


图 9 电压电流跟踪

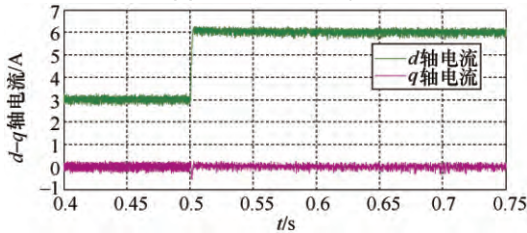


图 10 $d-q$ 轴电流

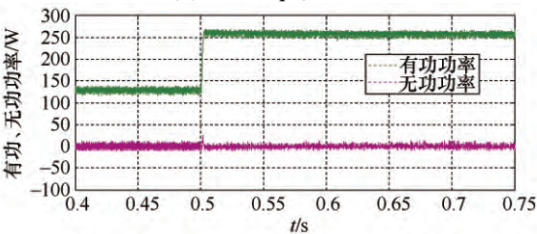


图 11 有功、无功功率

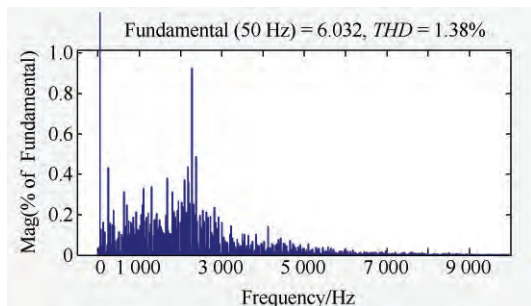


图 12 输出电流谐波

结束语

本文提出了一种基于 LC 型滤波的并网逆变器电流跟踪型控制策略, 可比传统的单 L 型滤波器更加有效地抑制逆变器侧入网电流中所含的大量高次谐波。同时, 与 LCL 型滤波器相比, LC 型滤波器简单实用, 成本低, 避免了可能造成谐振峰的情况, 提高了系统的稳定性。

该系统的控制策略采用了逆变器入网电流的反馈控制方法, 为系统减少了霍尔传感器的使用, 从而降低了系统成本。从 Matlab 仿真的结果表明, 该控制策略能够有效使电流快速跟踪上电网电压, 使系统具有优良的动静态响应性能。最后

进行了 FFT 分析, 得出的电流谐波畸变率 $THD = 1.38\%$, 完全符合国家标准, 验证了该控制策略的可行性和正确性。此外, 该策略同样适用于需对入网电流进行采样的不间断电源、有源滤波器等系统。

参考文献

- [1] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2006, 53 (5): 1398-1409.
- [2] 李永东. 脉宽调制 (PWM) 技术——回顾、现状与展望 [J]. 中国第四届交流电机调速传动学术论文集, 1995: 1067-1081.
- [3] 王学华, 阮新波, 刘尚伟, 等. 抑制电网电流谐波影响的并网逆变器控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (6): 7-14.
- [4] 许津铭, 谢少军, 肖华锋, 等. LCL 滤波器有源阻尼控制机制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (9): 27-33.
- [5] 王要强, 吴凤江, 孙力, 等. 带 LCL 输出滤波器的并网逆变器控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (12): 34-39.

(收稿日期: 2014-03-28) EA

(上接第 59 页)

采用高速数据采集卡和累加平均技术, 提高了系统的测量准确度, 取得了较好的解调效果。

分布式光纤测温技术的应用范围越来越广, 涉及电力系统、石油化工、交通运输和城市建设等领域, 对其性能要求也在不断提高。随着信息时代和智能时代的到来, 安全稳定的电力供应成为信息传递和设备集成最根本的保障。同时, 分布式光纤测温技术将实现网络互联, 推动智能电网的发展。

参考文献

- [1] 韩永温, 郝文杰, 张林行. 基于拉曼散射原理的分布式光纤测温系统研究 [J]. 半导体光电, 2013, 34 (2): 342-345.

- [2] 全国消防标准化委员会第六分技术会. GB/T 21197—2007 线型光纤感温火灾探测器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [3] 常程, 李铮, 周荫清. 基于系统工程方法论的分布式光纤后向 Raman 散射测温系统设计 [J]. 光子学报, 2001, 30 (1): 50-53.
- [4] 吴延华, 李志鹏, 于宏艳. 分布式光纤测温系统中解调方法的优化 [J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40 (2): 216-218.
- [5] 张在宣, 王剑锋, 余向东, 等. Raman 散射型分布式光纤温度测量方法的研究 [J]. 光电子·激光, 2001, 12 (6): 596-600.
- [6] 李志鹏, 郭伟, 陈雷. 分布式光纤测温系统在轨道交通中的应用 [J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17 (5): 149-153.

(收稿日期: 2014-06-24) EA