

文章编号:1005-0523(2013)06-0025-05

基于LCL滤波器的单相光伏并网三环控制策略

张书林,王 勋,程宏波

(华东交通大学电气与工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:引入LCL滤波器代替L型和LC型滤波器。分析了有源阻尼算法,针对在光照过强的条件下由于输入功率和输出功率不匹配出现的直流母线过电压现象,提出直流母线电压环、电网电流环、电容电流环三环控制策略,稳定直流母线电压。搭建了单相光伏并网控制系统模型,详细分析了所设计的控制策略,仿真结果表明,采用新型控制策略能有效控制直流母线电压,改善入网电流品质,提高系统的稳定性。

关键词:光伏并网;逆变器;LCL滤波器;直流母线电压;控制

中图分类号:TM615

文献标志号:A

近年来,太阳能光伏发电作为可再生能源,受到越来越多的关注^[1-2]。并网逆变器是光伏并网发电的核心。在逆变器和电网之间一般连接滤波器抑制谐波,减少对电网的污染。相对于L、LC滤波器,LCL滤波器具有体积小、更好的抑制高次谐波等性能^[3]。实际应用中,由于逆变器输出功率设定,光照过强时,由于对最大功率点的跟踪会导致直流侧母线电容过电压,增大电容纹波电流,减小其使用寿命,破坏系统稳定^[4]。

针对这一现象,文献[5]通过对电容纹波电流和容值关系的计算,通过选择合适的容值来降低纹波电流,但是并未考虑到母线过电压的影响。文献[6]提出增大直流母线电容来限制过电压,但是成本增大,系统的响应速度也降低。本文基于LCL滤波器,提出一种新型逆变控制策略,由电压环、电容电流环、网侧电流环组成,直流电压环能有效的控制直流母线过电压,电容电流环解决LCL滤波器的谐振问题,网侧电流环直接电流控制能有效的控制入网电流和电压。本文对新型控制策略进行了详细分析,并且设计了相关参数,最后进行了仿真验证。

1 单相光伏并网控制策略

1.1 系统结构

图1所示为基于LCL滤波器的单相光伏并网发电系统的系统结构,光伏阵列输出直流电通过升压电路达到逆变要求,升压输出通过直流母线电容接入逆变器,逆变器的交流侧与LCL滤波器连接,并接入电网。

图1中, U_{pv} , I_{pv} 分别为光伏阵列输出电压和电流, U_b 为直流母线电容电压; i_{ci} 为LCL滤波器电容电流; R_1 , R_2 分别为电感 L_1 , L_2 的内阻; i_s 为入网电流, u_s 为电网电压。

系统控制分为升压电路的MPPT控制和逆变并网控制。MPPT控制的意义在于采集光伏阵列的输出电压,调节系统内阻,以使光伏组件任意时刻输出最大功率。逆变控制是采用三环控制,直流侧电压环的作用是保证直流侧电压和电流的稳定,电容电流环和网侧电流环则是保证入网电压电流电压的有效稳定输出。系统控制框图如图2所示,虚线部分为直流母线保护环。

收稿日期:2013-07-16

基金项目:江西省自然科学基金(20132BAB216027)

作者简介:张书林(1987—),男,硕士研究生,研究方向为光伏发电。

式中: K 为增益系数

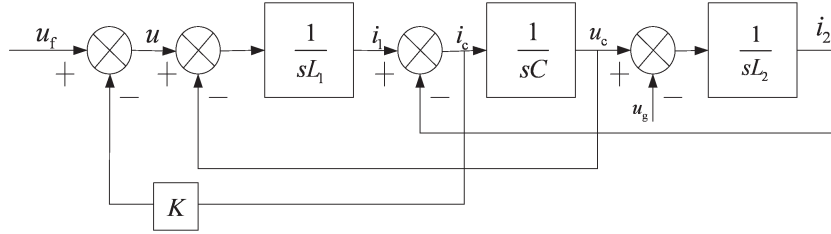


图3 有源阻尼控制框图

Fig.3 Active damping control block diagram

通过合理设置增益系数 K , 能有效的发挥有源阻尼的效果, 不仅能有效的抑制谐振, 同时还能避免无源阻尼造成的系统损耗。由于 LCL 滤波器有源滤波算法使得并网电压和电流相差 180° ^[11], 故需要增加一个相位滞后环节, 来调整并网电流相位。相位滞后环节的传递函数 H_{zh} 为

$$H_{zh}(s) = \frac{T_1 s + 1}{\beta T_1 s + 1} \quad (3)$$

1.3 电网电流环

由图2可以得到, 电网电流环的开环传递函数 $G_{lk}(s)$:

$$G_{lk}(s) = \frac{1}{T_0 s + 1} \times G_{bl}(s) \times \frac{K}{0.5 T_0 s + 1} \times G_1(s) \times K_t \quad (4)$$

由于 PWM 具有强耦合非线性特性, 因而可以用一个时间常数的惯性环节 $\frac{1}{0.5 T_0 s + 1}$ 来代替。忽略电感内阻, 得到电感 L_2 上电流 i_2 与占空比 d 之间的传递函数 $G_1(s)$

$$G_1(s) = \frac{i_2(s)}{d(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s} \quad (5)$$

为了提高电流环的低频增益和高频抑制, 加快跟踪速度和减小稳态误差, 增加补偿环节 $G_{bl}(s)$:

$$G_{bl}(s) = K_{bc} \frac{\tau s + 1}{\tau s} \quad (6)$$

式中: τ 为时间常数, $\tau = 1$, K_{bc} 为补偿系数, 取 $K_{bc} = 0.5$, 结合 (3), (4), (5) 式, 可得电流内环传递函数 $G_{lk}(s)$

$$G_{lk}(s) = \frac{0.5}{T_0 s + 1} \times \frac{s + 1}{s} \times \frac{K}{0.5 T_0 s + 1} \times \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s} \times K_t \quad (7)$$

电流环的闭环传递函数 $G_{lb}(s)$

$$G_{lb}(s) = \frac{1}{K_1} \times \frac{G_{lk}(s)}{G_{lk}(s) + 1} \quad (8)$$

由于开关频率很高, 可以忽略二次项, 式 (8) 可以简化成下式:

$$G_{lb}(s) = \frac{1}{K_1(1 + 3 T_0 s)} \quad (9)$$

1.4 直流母线环

由图2可得, 直流母线环开环传递函数 $G_{bk}(s)$ 为

$$G_{bk}(s) = G_{bc}(s) \times \frac{1}{T_s s + 1} \times K_b \times G_b(s) \quad (10)$$

根据升压电路模型, 可得直流母线电容输出电压与输入电流的传递函数 $G_b(s)$, 即

$$G_b(s) = \frac{V_{cz}(s)}{i_{cz}(s)} = \frac{1}{C_z s} \quad (11)$$

式中: C_z 为直流母线电容值。

与电流内环相同, 加入补偿环节 $G_{bc}(s)$ 以增加开环增益, 提高动态响应性能和滤除高次谐波

$$G_{bc}(s) = K_c \frac{\tau s + 1}{\tau s} \quad (12)$$

式中: K_c 为补偿系数,按照系统参数整定,可得

$$K_c = \frac{3C_z K_l}{K_b \tau} = 0.24 \quad (13)$$

综合可得,直流母线环开环传递函数为

$$G_{bk}(s) = \frac{1}{C_z s + 1} \times \frac{0.24}{T_s s + 1} \times K_b \times \frac{s + 1}{s} \quad (14)$$

1.5 前馈设计

由于双闭环直接电流控制策略所设计的内环带宽远高于外环,使得外环的响应速度很慢,影响系统的稳定,所以采用电网电压前馈方式,来改善闭环系统的抗电网干扰能力,提高系统稳定性^[12-13]。

当直流侧电压一定时,电网电压前馈增益系数应为逆变电路增益的倒数,从而抑制电压的扰动,改善系统性能。即

$$K_f = \frac{1}{K} = 0.008 \quad (15)$$

2 仿真与分析

应用PSIM仿真软件搭建了单相光伏系统并网模型,系统参数设置如表1所示。MPPT采用扰动观察法。

表1 参数设置

Tab.1 Parameter settings

参数	数值	参数	数值
光伏阵列开路电压 U_d/V	344	电网频率 f/Hz	50
光伏阵列短路电流 I_d/A	13	系统开关频率 f_s/Hz	20 000
光照强度 $L_x/W \cdot m^2$	1 000	滤波电感值 L_1/mH	3
温度 $T/^\circ C$	25	滤波电感值 L_2/mH	0.6
升压电路电感值 L/mH	1	滤波电容值 $C/\mu F$	5
升压电路电容值 $C_s/\mu F$	100	功率因数 $\cos \varphi$	1
直流母线电容值 $C_z/\mu F$	400	滞后系数 β	37
直流母线电容额定电压 U_z/V	380	电容电流采样系 K	126
直流母线电容保护电压 U_{zp}/V	400	电网电流采样系数 K_l	0.1
三角波周期 $T_s/\mu s$	50	直流母线电压采样系数 K_b	0.005

系统并网电流、电压波形如图4所示,其中 I_2 、 I_3 分别为采用普通L型滤波器和LCL型滤波器的入网电流波形。可以看出采用LCL型滤波器能获得更好的电流品质。但由于有源阻尼的动态调节,使得入网电流和电压相位差了 180° ,故增加一个相位滞后环节来解决。 I_4 为增加相位滞后环节后,入网电流波形, U_4 为入网电压波形,从图中可以看出电压、电流同频同相,使得输出功率为1,有效的抑制了LCL滤波器谐振问题。

图5为直流母线电压环仿真结果,结果表明,在光照强度增加到 $1\,500\,W \cdot m^2$ 时,直流母线电压 U_c 会直线增加,而加入了母线电压保护环后,母线电压 U_{cl} 能稳定在380V左右。同时,加入直流母线保护环以后,电容电流电流波纹 I_{cl} 比原来的电容电流 I_{c2} 波纹明显减小,增加了系统稳定性,延长了电容使用寿命。

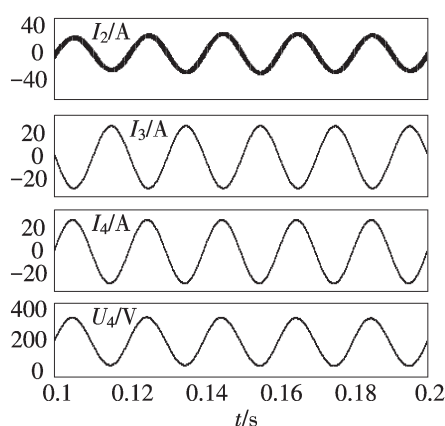


图4 并网电流、电压波形图

Fig.4 Grid current and voltage waveforms

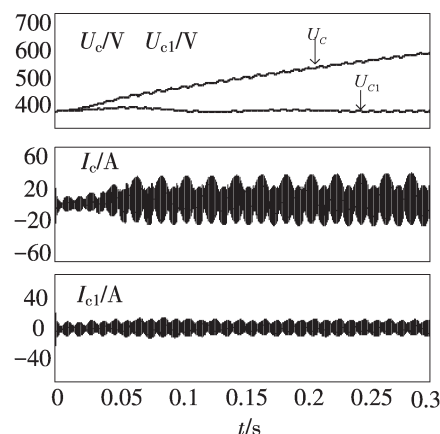


图5 直流母线保护环验证图

Fig.5 The DC bus protection validation ring

3 结论

本文基于LCL滤波器提出了一种新型光伏并网控制策略,在光照过大的条件下,对直流母线过电压进行保护。仿真结果表明:

- 1) 采用LCL滤波器能有效改善入网电流质量,减少高次谐波对电网的污染;
- 2) MPPT和有源阻尼算法的动态调节,使得入网电流与电压相位相差 180° ,可以采用参考电流相位滞后环节来解决;
- 3) 所设计的直流母线电压保护环能有效的保护直流母线电容过电压,减小直流母线电感波纹,提高其使用寿命。

参考文献:

- [1] 刘东冉,陈树勇,马敏,等.光伏发电系统模型综述[J].电网技术,2011,35(8):47-52.
- [2] 廖志凌,阮新波.独立光伏发电系统能量管理控制策略[J].中国电机工程学报,2009,29(21):46-52.
- [3] 易映萍,卢开平,王林.基于LCL滤波器的光伏并网逆变器控制策略[J].电力自动化设备,2011,31(12):54-59.
- [4] 陈诚,王勋,陈宏波.基于改进双闭环控制的光伏并网系统研究[J].华东交通大学学报,2012,29(5):50-56.
- [5] 王正,于新平.逆变电源母线电容波纹电流与容值优化研究[J].电源学报,2012(4):86-90.
- [6] JONG W C, SEONG K S. Fast current controller in three-phase AC/DC boost converter using d-q axis crosscoupling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(1):179-185.
- [7] 张崇魏,张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003:437-461.
- [8] 伏祥运,王汝田,王建绩,等.基于PSO算法的有源滤波器的优化配置[J].电气应用,2007,26(2):61-64.
- [9] 邓红英,赵勇,陈志鹤.考虑谐波源随机性的有源滤波最优配[J].电力系统自动化,2000,21(1):12-15.
- [10] MALINOWSKI M, BERNET S. A simple voltage sensorless active damping scheme for three-phase PWM converters with an LCL filter[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2008, 55(4):1876-1880.
- [11] Twinning E, Holmes D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18(3):888-895.
- [12] 许津铭,谢少军,肖华锋. 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.
- [13] 宋平岗,王锴,兰洁,等.直接功率控制在三相光伏并网系统中的研究[J].华东交通大学学报,2013,30(1):10-14.

(下转第39页)

参考文献:

- [1] 马杰克. 优美图[M]. 北京:北京大学出版社,1991:1-247.
- [2] 杨显文. 关于 C_{4m} 蛇的优美性[J]. 工程数学学报,1995,12(4):108-112.
- [3] 吴跃生. 关于圈 C_{4h} 的 $(r_1, r_2, \dots, r_{4h})$ -冠的优美性[J]. 华东交通大学学报,2011,28(1):77-80.
- [4] 吴跃生,李咏秋. 关于圈 C_{4h+3} 的 $(r_1, r_2, \dots, r_{4h})$ -冠的优美性[J]. 吉首大学学报:自然科学版,2011,32(6):1-4.
- [5] 吴跃生. 关于图 $P_{6k+5}^3 \cup P_n^3$ 的优美性[J]. 吉首大学学报:自然科学版,2012,33(3):4-7.
- [6] 吴跃生,徐保根. 两类非连通图 $(P_2 \vee \overline{K_n})(0, 0, r_1, 0, \dots, 0, r_n) \cup St(m)$ 及 $(P_2 \vee \overline{K_n})(r_1 + a, r_2, 0, \dots, 0) \cup G$ 的优美性[J]. 中山大学学报:自然科学版,2012,51(5):63-66.
- [7] 吴跃生. 图 $C_7(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, 0, 0) \cup St(m)$ 的优美性[J]. 吉首大学学报:自然科学版,2012,33(5):9-1.
- [8] 吴跃生,王广富. 关于 $C_{4h+1} \odot K_1$ 的 $(Gr_1, Gr_2, \dots, Gr_{4h+1}, Gr_{4h+2})$ -冠的优美性[J]. 山东大学学报,2013,48(4):25-27.
- [9] 吴跃生. 关于圈 C_{4h+3} 的 $(Gr_1, Gr_2, \dots, Gr_{4h+3})$ -冠的优美性[J]. 吉首大学学报:自然科学版,2013,34(4):1-6.
- [10] 吴跃生,王广富,徐保根. 非连通图 $C_{2n+1}UG_{n-1}$ 的优美性[J]. 华东交通大学学报,2012,29(6):26-29.

The Graceful Labeling of the Unconnected Graph $C_3(m,0,0)UG$

Wu Yuesheng

(School of Basic Science, Eastchina Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The gracefulness of the unconnected graph $C_3(m,0,0)UG$ is discussed. Two graceful labelings of the unconnected graph $C_3(m,0,0)UG$ are then explored in details.

Key words: graceful labeling; graceful graph; cycle

(上接第29页)

Single-phase Photovoltaic Grid-loop Control Strategy Based on LCL Filter

Zhang Shulin, Wang Xun, Cheng Hongbo

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

Abstract: Based on LCL filter instead of L and LC type filter, through active damping algorithm, in response to the DC bus overvoltage phenomenon due to the mismatching of input and output power when the light is too strong, this paper proposes the loop control strategy of DC bus voltage loop, current loop power and capacitor current loop in order to stabilize DC bus voltage. A single-phase photovoltaic grid control system model is established and a detailed analysis of the design of the control strategy is carried out. The simulation results show that the new control strategy can effectively control the DC bus voltage, improving current quality and system stability.

Key words: PV grid; inverter; LCL filter; DC bus voltage; control