

单相光伏并网逆变器群控 供电系统的建模与控制

陈建伟

(许继变压器有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要 分析了光伏并网逆变器群控系统中环流产生的机理,并导出了影响环流数值的因素。通过进一步分析找出逆变器输出的功率与环流之间的关系。在单台并网逆变器控制方法之上,设计出并网逆变器群控系统的环流抑制的方法,并对环流抑制方法的稳定性作了进一步分析。最后给出了并联控制系统仿真输出电流波形以及样机实验波形,并对理论分析、仿真波形以及实验结果进行比较。从仿真波形以及实验结果来看,所采取的控制措施是完全正确的。

关键词: 逆变器; 环流抑制; 群控系统; 平均电流

Modeling and Control of Single Phase Photovoltaic Grid-connected Inverters Control System

Chen Jianwei

(Xuji Transformer Corporation Ltd., Xuchang, He'nan 461000)

Abstract Generating loop current mechanism of photovoltaic grid-connected inverters based on Group control system is analyzed and influent factors of loop current are also derived. Relationship between output power of the inverter and surround current is found by the further analysis. On the base of single grid-connected inverter control method, control system of circulating current restraining method with group control system. Stability of circulation inhibition method is analyzed further. Finally, the control system simulation result and experimental waveforms are given and the theoretical analysis, simulation and experimental results are compared. From the simulation and experiment results, the realizing method and control strategy are entirely correct.

Key words: inverter; loop current suppression; group control system; average current

随着光伏发电应用的规模不断扩大,单台逆变器很难满足供电系统的要求,为了增加光伏电池输出的容量和提高系统的可靠性,这就要求多台光伏逆变器共同向负载或电网输送功率。使用多台逆变器供电具有更大的灵活多变特性,当其中的一台逆变器出现故障退出系统,其它逆变器可以正常工作,继续提供电能,大大提高了供电系统的可靠性。但是光伏逆变器在并联过程中的控制难度远远超过直流电源的并联供电系统,主要原因是在输出端不但要保证电压幅值与系统匹配,同时输出频率和相位同样要与电网保持一致^[1]。多台供电系统的关键难题是解决好存在其中环流问题。由于各逆变器在设计过程中的参数虽然选取一致,但是由于制造工艺的局限性,各个元器件各

种特性不可能完全一致,触发脉冲也不能完全同步,这就导致环流存在。环流在逆变器内部构成回路,一方面环流降低逆变器的效率,同时环流还会增加逆变器的损耗,增加逆变器温升,降低逆变器运行的可靠性。对于并网光伏逆变器,逆变器运行的可靠性不但影响自身,当逆变器功率较大时,还会影响电网稳定性,因此逆变器的环流抑制的好坏是保障整个系统安全运行的关键所在^[2]。

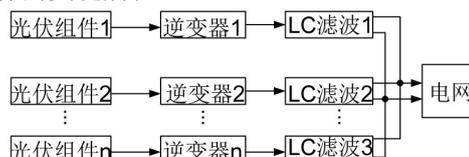


图1 多台光伏逆变器供电模式

1 逆变器环流产生的原理及影响因素

在实际应用过程中逆变器需要多台并联使用，为了简化分析过程，以两台单相光伏并网逆变器为例来说明环流产生的机理及影响因素，图 2 为两台单相光伏并网逆变器并联供电的主电路。当逆变器 1 中的开关管 VT1、VT4 触发导通时，在两台逆变器中产生环流的回路有两种：

回路 1: P1-A1-A-A2-P2-N2-B2-B1-N1-P1

回路 2: P1-A1-A-A2-N2-P2-B2-B1-N1-P1

同样，当逆变器 1 中的开关管 VT2、VT3 触发导通时，在两台逆变器中产生环流的回路同样有两种：

回路 1: P1-B1-O-B2-P2-N2-A2-A1-N1-P1

回路 2: P1-B1-O-B2-N2-P2-B2-B1-N1-P1

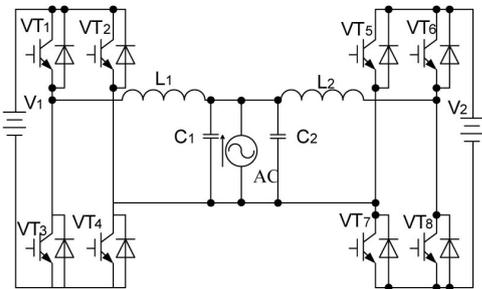


图 2 单相并网逆变器并联供电的主电路

也可以逆变器中的开关管的导通与关断作为依据，来分析环流回路，所形成的回路是一致的。因此，无论开关管处于怎样的工作状态，并网逆变器在并联供电系统中，存在环流回路。设逆变桥输出交流电压基波分别为 V_1 和 V_2 ；电网电压为 V_0 ；逆变器输出电流分别为 I_1 和 I_2 ；电容器 C1、C2 流过的电流分别为 I_{C1} 和 I_{C2} ；电感 L1、L2 流过的电流分别为 I_{L1} 和 I_{L2} 。由 KCL 及 KVL 电路定理可得电压与电流的矩阵方程为：

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_{C1} \\ I_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j\omega L_1} & 0 & \frac{1}{j\omega L_1} - j\omega C_1 \\ 0 & \frac{1}{j\omega L_1} & \frac{1}{j\omega L_2} - j\omega C_2 \\ 0 & 0 & j\omega C_1 \\ 0 & 0 & j\omega C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

那么环流大小为

$$I_H = I_1 - I_2 = \frac{V_1}{j\omega L_1} - \frac{V_2}{j\omega L_2} - V_0 \left[(j\omega C_1 - j\omega C_2) + \left(\frac{1}{j\omega L_1} - \frac{1}{j\omega L_2} \right) \right] \quad (2)$$

可见环流的大小不但与逆变桥输出电压有关，

同时与滤波参数也有关。若想流过并联逆变器的环流为零，只要保证两台逆变器输出电流幅值的大小、相位相同即可。由于两台逆变器输出电压均为电网电压，那么控制输出电流的大小，也可以等价位控制系统有功功率、无功功率的大小。

2 并网逆变器环流控制策略

单台逆变器实现稳定工作是整个光伏并网逆变器群控系统稳定工作的基础。图 3 为一台单相光伏并网逆变器常用的控制结构框图^[3-4]。

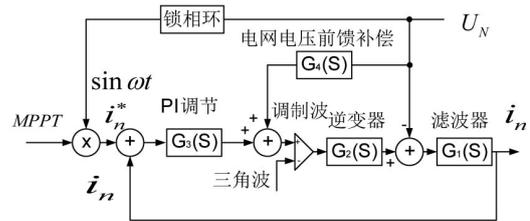


图 3 单台光伏并网逆变器控制图

这里 i_n 为逆变器输出电流， i_n^* 输出电流的参考值。在结构框图中，考虑电压前馈系数取逆变器函数的倒数即

$$G_2(s) = \frac{1}{G_4(s)} \quad (3)$$

可以得出输出电流与参考电流之间的关系为

$$i_n(s) = \frac{G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s)}{1 + G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s)} \cdot i_n^*(s) \quad (4)$$

$n = 1, 2$

如果并联逆变器参数在设计过程尽量选取一致，开关管的选择同一批次产品。光伏逆变器的环流大小为

$$I_H(s) = I_1(s) - I_2(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \cdot [I_1^*(s) - I_2^*(s)] \quad (5)$$

因此只要保证每台逆变器选用同一标准参考电流就可以满足要求。但是在实际应用中，控制系统中电压外环实现最大功率跟踪，由于光伏电池安装的位置可能有差异，这样就会造成每台逆变器最大功率跟踪点有所差别，从而造成逆变器之间存在环流。

参考电流的频率与相位跟踪电网电压的频率与相位，因此每台并网逆变器的输出电流频率与相位均与电网电压一致^[5]，不同的只是由于对最大功率进行跟踪造成的参考电流的幅值不同。因此为了避免光伏并网逆变器之间形成环流，可以牺牲部分逆变器直流侧对最大功率跟踪的效率，但是这样会降

低光伏发电的效率。最为合理的方式是再增加电流偏差控制环，这样不会影响最大功率跟踪的效率。基于这种思想，可以构建出并联并网逆变器环流抑制的控制结构框图如图 4 所示。从结构框图可以得出两台逆变器输出电流与参考电流及平均电流之间的关系为

$$\begin{cases} I_1(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{1+2G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \cdot [I_1^*(s) + I_{AV}^*(s)] \\ I_2(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{1+2G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \cdot [I_2^*(s) + I_{AV}^*(s)] \end{cases} \quad (6)$$

可见，在每台逆变器的输出电流与参考电流之间多了一项平均电流干扰项，输入电流与参考电流之间不再是一一对应关系，因此系统的控制难度加大。

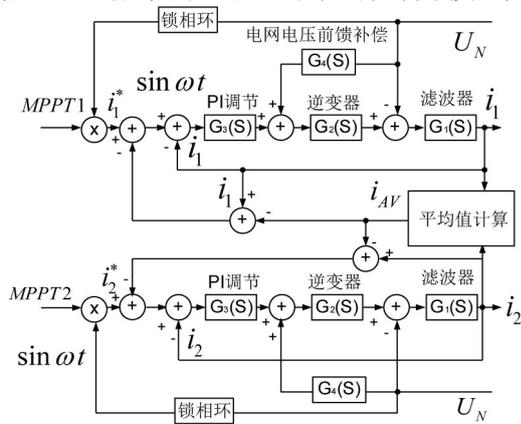


图 4 两台并网逆变器并联供电系统控制结构
同理可以求的环流与参考电流之间的关系为

$$\begin{aligned} I_H(s) &= I_1(s) - I_2(s) \\ &= \frac{2G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{1+2G_1(s)G_2(s)G_3(s)} [I_1^*(s) - I_2^*(s)] \end{aligned} \quad (7)$$

对于并联供电的逆变器采用同步触发，参考电流 i_1^* 、 i_2^* 的频率及相位是相同的，不同的只是二者的幅值不同，因此

$$\begin{aligned} I_H(s) &= I_1(s) - I_2(s) \\ &= \frac{2G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{1+2G_1(s)G_2(s)G_3(s)} [\Delta I(s)] \end{aligned} \quad (8)$$

在实际执行过程中，通过计算所有逆变器的输出电流的平均值，并把平均值与每台逆变器输出电流进行比较，把差值反馈到参考电流的给定，最终使得每台逆变器输出电流相等。以 2 台 3kW 并联供电的并网逆变器为例，其直流侧最大功率电压的跟踪范围 220~380V，输出电压为 220V，每台逆变器的输出滤波电感通过设计选取 1.5mH，电流内环采用 PI 控制其具体参数为 $k_p = 0.5$ 、 $k_i = 0.0375$ 。

那么可以得出

$$\begin{cases} G_1(s) = K_{pwm} \\ G_2(s) = 0.5 + \frac{S}{0.00375} \\ G_3(s) = \frac{1000}{1.5S} \end{cases} \quad (9)$$

那么并联供电控制系统闭环传递函数特征方程为 $1333.2K_{pwm} + 100K_{pwm}s + s^2 = 0$ (10)

1) 对应的系数为

$$a_0 = 1, a_1 = 100K_{pwm}, a_2 = 1333.2K_{pwm} \quad (11)$$

K_{pwm} 为逆变器的增益，一定是大于零的数，因此，特征方程对应的系数均大于零。

2) 由其系数构成的行列式为

$$D = \begin{vmatrix} 100K_{pwm} & 0 \\ 1 & 1333.2K_{pwm} \end{vmatrix} > 0 \quad (12)$$

满足劳-茨稳定性判据判定系统稳定性的条件。因此控制系统是稳定的^[6]。

3 并网控制系统的仿真及实验结果

为了验证所提出的控制策略的正确性，建立了 2 台 3kW 并网逆变器并联运行的仿真模型。图 5 为电网电压波形以及两台逆变器输出的电流波形，从仿真波形可以看出逆变器输出电流能够完全跟踪电网电压波形，同时逆变器之间的环流得到很好的抑制。在分析和仿真的基础之上，设计出 2 台并网逆变器的并联供电运行实验模型，图 6 为两台逆变器并联运行的电流输出波形，2 台并网逆变器输出的电流波形的相位和频率同步较好，幅值几乎完全一致，达到了较好的均流目的。由于三相并网逆变器在稳态工作时，三相电流是完全对称的，因此对于单相并网逆变器环流抑制的方法完全可以应用到三相并网逆变器中去。

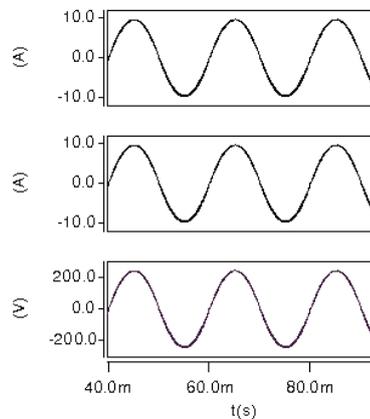


图 5 电网电压及并网逆变器输出的电流波形

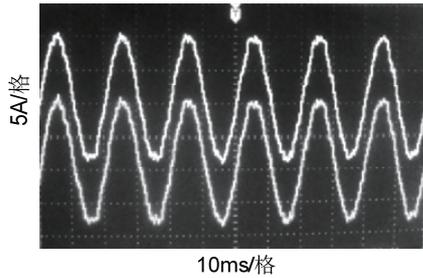


图6 并联逆变器输出的实验电流波形

参考文献

- [1] 吕富勇,李永新,王芹,等. 模块化高精度大功率高压电源并联技术[J].高电压技术,2008,34(3):587-591.
- [2] 徐德鸿.电力电子系统建模及控制[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 文春雪,李正熙.基于虚拟电阻控制环的并联逆变器简化控制方法[J].电工技术学报,2012,27(6):63-68.
- [4] 陈大威,朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7):117-122.
- [5] 吕志鹏,罗安,荣飞,等.电网电压不平衡条件下微网PQ控制策略研究[J].电力电子技术,2010,44(6):71-74.

- [6] 卢继平,白树华. 风光氢联合式独立发电系统的建模及仿真[J].电网技术,2007,31(22):75-79.
- [7] 李练兵,赵治国,赵昭,等. 基于复合控制算法的三相光伏并网逆变器系统的研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):44-47.
- [8] 李明,易灵芝,彭寒梅,等. 光伏并网逆变器的三环控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):46-50.
- [9] 方如举,吕延会,张元敏. 燃料电池逆变供电系统的建模和控制[J].电力系统保护与控制,2012,40(13):90-94.
- [10] 李芬,邹旭东,邹云屏,等. 并网LCL滤波的PWM整流器输入阻抗分析[J].电工技术学报,2010,25(1):97-103.
- [11] LIAO H, WU CH SH. A voltage stability droop control strategy of wireless parallel inverters[C]. Proceedings of the Electrical and Control Engineering, 2010: 4978-4981.

作者简介

陈建伟(1977-),男,安徽砀山人,工程师,1999年毕业于合肥工业大学电气工程系,现从事电气产品的设计和研发工作。

News 新闻与动态

青海电网建设第二代雷电监测系统提高电网防灾能力

近期,国家电网青海公司已着手开展第二代雷电监测系统建设的前期准备工作,进一步完善公司雷电监测系统使用功能,有力提升青海电网雷电防护水平,将雷电对电网的危害降到最低程度。

雷电监测系统已成为我国电网防雷减灾的基础平台,在雷击故障点快速定位、雷击事故鉴别、雷电短时预警等方面发挥着重要作用,它可以实时显示雷击的发生时间、位置、雷电流幅值、回击次数等各种雷电参数。2013年,青海电网已完成新一代雷电监测系统一期工程建设,实现了探测精度、探测效率和雷电数据计算、处理和存储效率的大幅提升,为实时掌握输电线路沿线的雷电活动情况及开展输电线路雷击故障分析提供了第一手资料。目前,青海电网雷电监测系统已达到43个探测站的规模,6月底将上升到50个,探测范围基本覆盖了青海电网110kV及以上输电线路走廊。

第二代雷电监测系统,将在原有系统功能的基础上,将“输电线路差异化防雷评估技术”融入其中,使雷电监测系统拥有更强大的应用功能。新技术的融入,可使系统拥有输电线路雷害风险评估的能力,弥补原系统无法直接衡量雷击跳闸率的缺憾,并可筛选出高风险区段,自动生成治理方案进行针对性防雷改造。同时,功能完善后的雷电监测系统还可搭建三维GIS全信息地理模型、雷电活动信息显示模型、输电及线路全塔型三维展示模型,实现全信息三维显示效果。

此外,新功能的有效融入还将代替人工评估过程中的数据录入、模型计算、结果分析等功能,效率和准确性都将得以大幅提高,操作人员可将更多的时间和精力运用到制定紧急治理、长期规划等多种改造方案中去,最终分布、分层的提升电网雷电防护水平,提高青海电网防灾能力。