

HERIC 单相光伏并网逆变器无功调制及其直接功率控制

刘斌¹, 黄清宝¹, 贺德强², 宋绍剑¹, 徐辰华¹, 林小峰¹

(1. 广西大学 电气工程国家级实验教学示范中心, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要:随着可再生能源在单相电网中渗透率的提高, 电网对单相光伏并网逆变器提出了无功输出与功率因数灵活控制的要求。对 HERIC (Highly Efficient and Reliable Inverter Concept) 拓扑的无变压器隔离型单相光伏逆变器进行研究, 提出了相应的无功调制策略。借助广义二阶积分构造两相静止坐标系, 基于瞬时无功功率理论, 建立了单相光伏逆变器的瞬时功率模型, 实现了单相光伏逆变器的直接功率控制。搭建了 5 kW 的实验平台, 通过实验对所提的调制策略与控制策略进行了有效性与实用性验证。

关键词: HERIC; 逆变器; 单相光伏逆变器; 无功调制; 直接功率控制; 瞬时无功功率理论

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.019

0 引言

分布式单相光伏并网发电系统近年来得到了深入研究和大力推广, 这使得分布式可再生能源在单相电网中的渗透率不断提升^[1]。当大量分布式电源接入单相电网时, 会造成单相电网的频率与电压扰动^[2-3]。另一方面, 为了获得较高的电能质量, IEEE1547 与 IEC61727 等相关标准对单相电网接入点的最大谐波畸变率与功率因数进行了规定^[3], 这就要求并网光伏逆变器具备有源滤波与无功补偿的相关功能, 甚至能接受上级电网调度实现无功功率的灵活注入, 以满足智能单相电网的建设需求^[4-5]。

无变压器隔离型光伏逆变器具有低成本、高效率及重量与体积方面的优势, 故而在单相光伏系统中得到普遍应用^[6-7]。无变压器型拓扑的基本思想是在续流阶段构造新的续流回路, 使得光伏电池输出与电网脱离, 以获得极低的共模电压变化率, 从而消除或减小由于光伏阵列分布电容产生的漏电流。在交流侧或直流侧构造辅助续流回路的无变压器型单相逆变器拓扑称为交流阻断型拓扑或直流阻断型拓扑。目前, 应用最多的单相无变压器隔离型光伏逆变器为 SMA 公司的 H5 桥拓扑与 Sunways 公司的 HERIC (Highly Efficient and Reliable Inverter Concept) 拓扑, 它们分别是直流阻断型拓扑与交流阻断型拓扑的代表。

在传统的调制与控制方式中, 作为小功率光伏发电装置的单相光伏并网逆变器都运行在单位功率因数工况。文献[8]已对直流阻断型 H5 拓扑进

行了无功补偿调制技术的研究, 而如何将 HERIC 逆变器进行适当的软件升级, 使其在不改变硬件配置的条件下具备无功输出功能, 是本文研究的重点。此外, 当光伏逆变器配合电网进行功率调节时, 单一的最大功率点追踪 (MPPT) 控制也不能满足新的需求, 需研究单相光伏系统的直接功率控制技术。

本文首先将 HERIC 逆变器的辅助续流回路进行高频调制, 在交流电网与光伏阵列阻断的同时, 可继续保持续流回路共模电压变化率恒定, 并实现无功功率的输出调制。对于直接功率控制技术, 依据瞬时无功功率理论对三相系统瞬时功率的定义, 可方便地应用于三相脉宽调制 (PWM) 变流器系统中^[9]。由于单相电压与电流都是一维矢量, 本文借助广义二阶积分构造两相静止坐标系下单相系统瞬时功率模型, 从而实现单相系统有功与无功功率的解耦与直接控制, 便于智能电网对单相光伏逆变器输出功率的灵活调度。最后通过搭建实验样机, 对本文所提的调制策略与直接功率控制策略进行了验证。

1 HERIC 无变压器单相光伏逆变器拓扑

Sunways 公司的 HERIC 拓扑原型是在由 S_1 — S_4 组成的单相逆变全桥的交流输出端增加 2 个辅助开关 S_5 与 S_6 , 由 S_5 与 S_6 串联组成交流辅助续流回路, 通过适当的调制可实现续流阶段电网与光伏阵列脱离。国内研究人员在此基础上将辅助电路设计为由 S_5 与 S_6 并联组成, 二极管 D_1 与 D_2 用来防止电流逆流, 形成如图 1 所示的新型 HERIC 拓扑, 其调制方式与 HERIC 拓扑原型一致。图中, u_{PV} 为直流侧输入电压; u_g 为单相电网电压; i_g 为输出并网电流; L_1 、 L_2 为输出滤波电感。光伏阵列与大地之间存在的分布电容 C_p 不可忽略, 在光伏逆变器的共模电压作用下, 产生漏电流 i_{leak} , 对人体接触存在潜在安全隐

收稿日期: 2017-06-09; 修回日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51765006); 广西自然科学基金资助项目 (2016GXNSFB380241, 2016GXNSFAA-380327)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51765006) and the Natural Science Foundation of Guangxi (2016GXNSFB380241, 2016GXNSFAA380327)

患^[10-11]。此外,该漏电流不但会增加入网电流的谐波含量和系统损耗^[12],还对系统的电磁兼容性能不利,带来传导和辐射干扰。

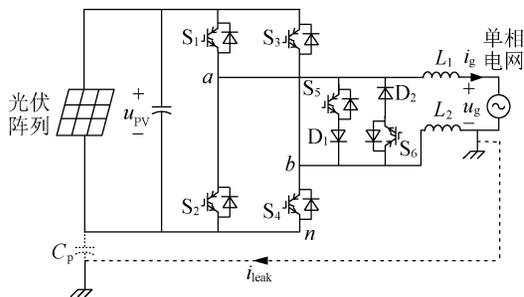


图 1 单相 HERIC 光伏逆变器电路拓扑

Fig.1 HERIC topology of single-phase PV inverter

2 无功输出调制策略

2.1 传统调制模式

图 2 为单相 HERIC 光伏逆变器单位功率因数工作时的调制方式时序图,此时电网电压 u_g 与并网电流 i_g 同频同相。参考电压 u_{ref} 与三角波比较产生功率管 S_1 — S_6 的驱动脉冲 u_{gs1} — u_{gs6} 。其中, S_1 — S_4 高频工作,而 S_5 与 S_6 的工作频率为电网电压频率的 2 倍。以图 1 所示拓扑为例,当电网电压处于正半波时,在调制阶段,其电流的调制通路为 PV (+) → S_1 → L_1 → 单相电网 → L_2 → S_4 → PV (-), 此时作用在分布电容 C_p 上的共模电压 u_{cm} 为桥臂对地电压 u_{an} 与 u_{bn} 之和的平均值:

$$u_{cm} = \frac{1}{2}(u_{an} + u_{bn}) = \frac{1}{2}(u_{PV} + 0) = \frac{1}{2}u_{PV} \quad (1)$$

当 S_1 — S_4 关断, HERIC 逆变器工作在续流阶段,续流通路为 L_1 → 单相电网 → L_2 → S_6 → D_2 , 单相电网与光伏阵列断开,此时由于开关管结电容的均压作用,桥臂输出点 a 与 b 对 n 点的电压为 $u_{an} = u_{bn} = 0.5u_{PV}$, 共模电压为:

$$u_{cm} = \frac{1}{2}(u_{an} + u_{bn}) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}u_{PV} + \frac{1}{2}u_{PV}\right) = \frac{1}{2}u_{PV} \quad (2)$$

由式(1)、(2)可看出,其共模电压 u_{cm} 维持不变,而 HERIC 逆变器的漏电流正比于分布电容与共模电压变化率:

$$i_{leak} = C_p \frac{du_{cm}}{dt} \quad (3)$$

因此,在这种调制方式下,HERIC 逆变器能保持在一个很小的值。当逆变器工作于电网电压负半波时有相同的结论。

2.2 新型调制策略

无变压器隔离型单相逆变器拓扑需要保证在续流阶段将光伏阵列与单相电网脱离,以消除或减小漏电流。当 HERIC 拓扑光伏逆变器需要向电网注

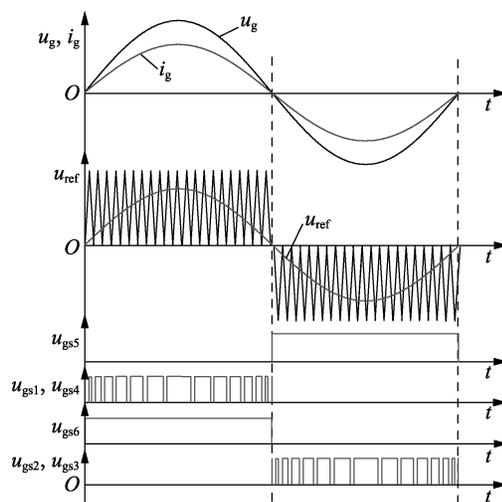


图 2 HERIC 光伏逆变器单位功率因数调制方式

Fig.2 Modulation strategy of HERIC inverter at unity power factor

入无功电流时,为了保持低漏电流的特性,就需要让续流回路的辅助功率管 S_5 与 S_6 工作在高频状态。

假设 HERIC 拓扑光伏逆变器输出滞后无功电流,电网电压 u_g 超前并网电流 i_g 角度 φ , 如图 3 所示。根据 u_g 与 i_g 的方向,可将调制参考波 u_{ref} 分为 4 个扇区。当 u_g 与 i_g 方向相同时,输出功率为正,为正功率调制扇区(图 3 中 II、IV 扇区);当 u_g 与 i_g 方向相反时,输出功率为负,为负功率调制扇区(图 3 中 I、III 扇区)。

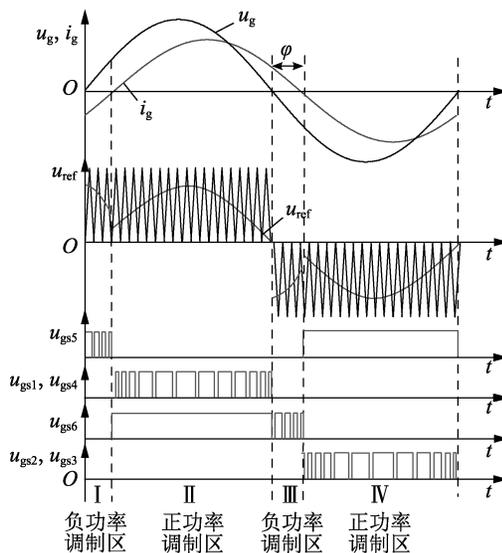


图 3 HERIC 光伏逆变器滞后无功调制方式

Fig.3 Modulation strategy of HERIC inverter at lagging power factor

在正功率调制扇区,调制策略与传统调制无异, S_1 — S_4 工作在高频, S_5 与 S_6 交替导通工作于低频。而在负功率调制区,由于电网电压 u_g 先于并网电流 i_g 变换方向, S_1 — S_4 全阻止,只能让 S_5 与 S_6 工作于高频,将储存在电感中的电流以正弦规律调制到 0,进

行换向,实现无功输出的调制。在该过程中,通过调制功率管 S_5 、 S_6 可控制续流回路的通断,使电感中的残余电流通过电感时产生电动势,由于功率管 S_1 — S_4 反并联二极管的作用,这一电动势被箝位于 u_{PV} 。因此,在 I、III 扇区,HERIC 桥臂输出 u_{ab} 仍可看作通过调制直流侧电压 u_{PV} 产生,这一电压的表达式为:

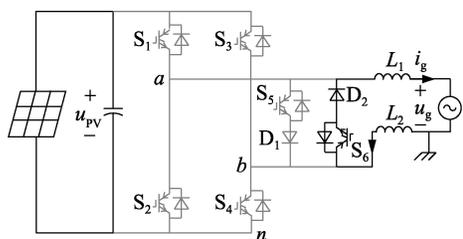
$$u_{ab} = L \frac{di_g}{dt} + u_g \quad (4)$$

其中, $u_g = U_m \sin(\omega t)$, $i_g = I_m \sin(\omega t - \varphi)$, U_m 为电网电压幅值, I_m 为电流幅值, ω 为电网电压角频率。计算得到 I、III 扇区占空比 d_5 、 d_6 为:

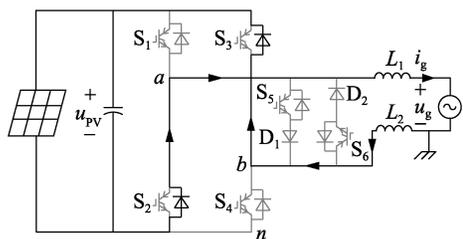
$$d_5, d_6 = \frac{LI_m \omega \cos(\omega t - \varphi) + u_g}{u_{PV}} \quad (5)$$

若采取与正功率调制区统一的三角波作为载波时,其参考波 u_{ref} 为不连续,因此无功调制策略为分段调制。

在 III 扇区中,HERIC 逆变器的工作模式如图 4 所示。图 4(a) 中, S_6 导通,电感电流通过路径 $L_1 \rightarrow$ 单相电网 $\rightarrow L_2 \rightarrow S_6 \rightarrow D_2$ 流通。当 S_6 关断时,电感电流经 $L_1 \rightarrow$ 单相电网 $\rightarrow L_2 \rightarrow S_3$ 反并联二极管 $\rightarrow PV \rightarrow S_2$ 反并联二极管 $\rightarrow L_1$, 如图 4(b) 所示。



(a) III 扇区调制阶段工作模式



(b) III 扇区续流阶段工作模式

图 4 III 扇区 HERIC 逆变器工作模式

Fig.4 Operation modes of HERIC inverter in section III

在无功输出调制的续流阶段(如图 4(b)所示),桥臂输出点 a 与 b 对 n 点的电压为 $u_{an} = 0$ 、 $u_{bn} = u_{PV}$,此时共模电压为:

$$u_{cm} = \frac{1}{2}(u_{an} + u_{bn}) = \frac{1}{2}(0 + u_{PV}) = \frac{1}{2}u_{PV} \quad (6)$$

当 HERIC 工作于无功输出调制的调制阶段(如图 4(a)所示),由于开关管的均压作用, u_{bn} 下降, u_{an} 上升,直到 $u_{an} = u_{bn} = u_{PV}/2$,共模电压为:

$$u_{cm} = \frac{1}{2}(u_{an} + u_{bn}) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}u_{PV} + \frac{1}{2}u_{PV}\right) = \frac{1}{2}u_{PV} \quad (7)$$

由式(6)、(7)可得,在本文所提无功输出调制下,HERIC 电路的共模电压 u_{cm} 仍能维持不变,保证了无变压器隔离单相光伏逆变器的低漏电流特性。

3 单相光伏逆变器直接功率控制

3.1 单相逆变器功率模型

利用 HERIC 光伏逆变器的无功调制策略,可方便地实现光伏逆变器无功功率输出,并满足日益提升的单相电网分布式可再生能源的渗透率条件下智能单相电网对无功功率灵活调节的需求。为了实现系统对光伏逆变器有功功率与无功功率的直接控制,本文采取基于瞬时无功功率模型的单相逆变器直接功率控制策略。

理想单相电网电压条件下,根据瞬时无功功率理论,可得到单相光伏逆变器 $\alpha\beta$ 坐标系下的瞬时有功功率 p 和无功功率 q 为:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中:

$$u_\alpha = U_m \sin(\omega t), \quad u_\beta = -U_m \cos(\omega t) \quad (9)$$

$$i_\alpha = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad i_\beta = -I_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (10)$$

本文通过采用广义二阶积分构造电网电压与电流矢量的正交分量的方法来建立 $\alpha\beta$ 坐标系,即:

$$u_\alpha(s) = u_g(s)D(s), \quad u_\beta(s) = u_g(s)Q(s) \quad (11)$$

$$i_\alpha(s) = i_g(s)D(s), \quad i_\beta(s) = i_g(s)Q(s) \quad (12)$$

其中, $D(s)$ 、 $Q(s)$ 为二阶广义积分,表达式如下:

$$D(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (13)$$

$$Q(s) = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (14)$$

其中, ω 为调谐频率,在此选择为电网工频频率; k 为性能参数,改变 k 值,可改变带通滤波选择性及响应特性^[13]。

3.2 直接功率控制策略

当光伏逆变器接收到上级有功功率调节指令 P_{cm} 与无功功率调节指令 Q_{cm} 后,与本地的 MPPT 控制输出 P_{mpp} 比较,并遵循以下规则,输出功率调节指令 p^* 与 q^* :

a. 当 $P_{cm} \geq P_{mpp}$ 时,功率调节器输出 $p^* = P_{mpp}$;

b. 当 $P_{cm} < P_{mpp}$ 时,功率调节器输出 $p^* = P_{cm}$;

c. $q^* = Q_{cm}$ 。

在理想单相电网条件下,将式(8)进行反变换,可得到由功率推算指令电流的变换式:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & -u_{\beta} \\ u_{\beta} & u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

定义 \mathbf{M} 为功率转换为电流的转换矩阵:

$$\mathbf{M} = \frac{2}{U_m^2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

电网电流的指令值:

$$i_g^* = i_{\alpha}^* \quad (17)$$

在单相系统中, i_{β}^* 被舍弃。图 5 为单相光伏逆变器直接功率控制的控制框图。其中, 电流环采用准比例谐振 QPR (Quasi Proportional Resonant) 控制器:

$$G_{PR}(s) = k_{PR} + \frac{2k_{ir}s}{s^2 + k_c\omega_c s + \omega^2} \quad (18)$$

其中, k_{PR} 为 QPR 控制器的比例系数; k_{ir} 为谐振系数; $k_c\omega_c$ 为准谐振的衰减项; ω 为谐振频率, 本文取电网电压角频率。QPR 控制器的参数选取可参考文献[14]。

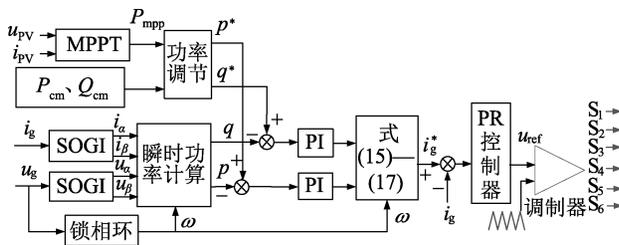


图 5 直接功率控制框图

Fig.5 Diagram of direct power control for HERIC

4 实验研究

为验证本文所提 HERIC 无功调制与直接功率控制策略的正确性, 搭建了 5 kW 实验样机。控制系统采取 TI 公司的 TMS320F28335 浮点运算的数字处理器芯片, 主频为 150 MHz, 完全满足本文实验控制所需。控制系统还外扩了 DA 芯片 AD5344BRU, 以便将有功与无功功率值进行输出测量。实验平台主电路参数如下: 额定容量 $S_e = 5 \text{ kV} \cdot \text{A}$; 输出频率 $f = 50 \text{ Hz}$; 额定电网电压 $u_g = 220 \text{ V}$; 开关频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$; 交流滤波电感 $L_1 = L_2 = 0.8 \text{ mH}$; 直流支撑电容 $C_{dc} = 3 \text{ mF}$ 。

图 6 为 HERIC 输出无功调制时的实验波形。图 6(a) 中, HERIC 逆变器功率因数为滞后 0.95 时, 电网电流 i_g 滞后电网电压 u_g , 桥臂输出电压 u_{ab} 波形呈现分段单极性调制特点。图 6(b) 中, HERIC 逆变器工作在功率因数为 0.95 (超前), 逆变器向电网注入超前的无功功率, 桥臂输出 u_{ab} 同样为分段调制波形。

图 7 为 HERIC 单相逆变器工作在滞后功率因数时, 逆变器桥臂 a、b 点对 n 点的电压 u_{an} 与 u_{bn} 以及两者之和 $u_{an} + u_{bn}$ 波形。从实验结果可以看出, 在本文所提的分段无功输出调制策略下, 2 倍于共模电压 u_{cm} 的

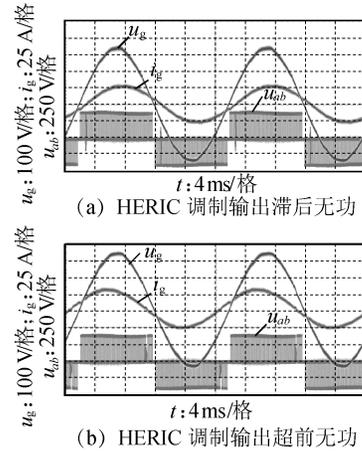


图 6 HERIC 逆变器输出滞后与超前无功功率波形

Fig.6 Waveforms of HERIC inverter at lagging and leading power factor

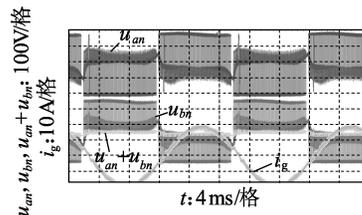


图 7 无功调制时桥臂输出电压 u_{an} 、 u_{bn} 与 $u_{an} + u_{bn}$ 波形

Fig.7 Waveforms of HERIC bridge voltage u_{an} , u_{bn} and $u_{an} + u_{bn}$ with reactive power modulation

$u_{an} + u_{bn}$ 电压波形变化率很小, 基本恒定, 说明本文的调制策略达到了抑制共模变化率的目的。

图 8 为 HERIC 单相逆变器采用传统的调制策

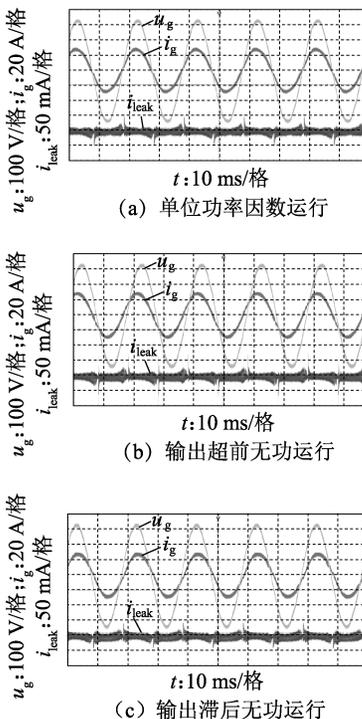


图 8 HERIC 逆变器单位功率因数与无功输出时的漏电流

Fig.8 Leak current of HERIC inverter at PF=1 and reactive power injection mode

略工作在单位功率因数与采用分段无功调制策略工作在无功输出模式下漏电流对比波形。在测量漏电流时,用一470 nF电容模拟分布电容 C_p 。从图8的实验波形可以看出,采用分段无功调制策略与传统的调制策略都能获得较低的漏电流,其平均值为20 mA,满足无变压器型非隔离光伏逆变器拓扑的相关标准。

图9为采用直接功率控制策略时,HERIC逆变器输出有功功率与无功功率的阶跃响应实验波形,其中有功功率 p 与无功功率 q 的波形为经DSP计算所得功率数字量由DA芯片AD5344BRU转换成模拟量后测得。如图9(a)所示,逆变器输出有功功率从3 000 W阶跃下降至1 500 W。图9(b)为直接功率控制策略下保持逆变器输出有功功率不变,而无功功率从超前的500 var调节至0的实验波形。从直接功率控制的实验波形可知,采用直接功率控制的HERIC逆变器能在一个周期内响应指令功率的变化,实现了对有功与无功功率的解耦控制,且稳定后无静差。

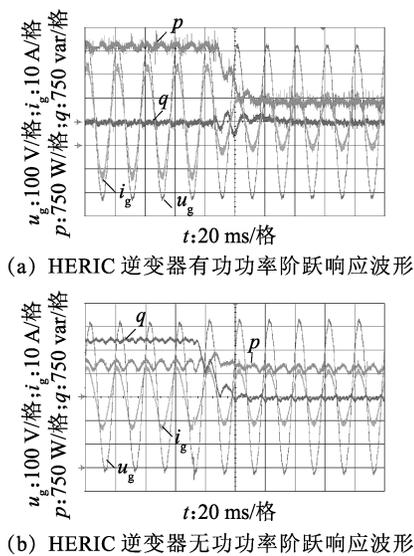


图9 HERIC逆变器直接功率控制波形

Fig.9 Waveforms of HERIC inverter based on direct power control strategy

5 结论

当分布式可再生能源的渗透率在单相电网中不断提升,要求并网逆变器能满足智能电网的调度需求,并实现对电网的无功支持与补偿。传统的HERIC无变压器隔离型光伏并网逆变器只能运行在单位功率因数的有功输出模式。本文采用分段调制的方法,在保留HERIC逆变器低漏电流特性的同时实现了任意功率因数的灵活无功功率输出;并基于瞬时无功功率理论,提出单相逆变器的直接功率控制,实现了有功功率与无功功率的解耦控制

及灵活输出,对单相智能电网的功率灵活调度有着现实意义。在本文基础上,下一步可对单相无变压器隔离型光伏并网逆变器的低电压穿越控制进行研究。

参考文献:

- [1] 王成山,李鹏. 2011年国际供电会议系列报道:分布式能源发展与用户侧电能的高效利用[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):1-5.
WANG Chengshan, LI Peng. A review of CIRED 2011 on development of distributed energy resources and energy efficiency improvement on customer side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 1-5.
- [2] LI Y W, KAO C N. An accurate power control strategy for power electronics-interfaced distributed generation units operating in a low voltage multi-bus microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [3] CHANG C H, LIN Y H, CHEN Y M, et al. Simplified reactive power control for single-phase grid-connected photovoltaic inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(5): 2286-2296.
- [4] AN L, CHEN Y, SHUAI Z, et al. An improved reactive current detection and power control method for single-phase photovoltaic grid connected DG system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4): 823-831.
- [5] YANG Y, WANG H, BLAABJERG F. Reactive power injection strategies for single-phase photovoltaic systems considering grid requirements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 4065-4076.
- [6] CAVALCANTIM C, OLIVEIRA K C D, FARIAS A M D, et al. Modulation techniques to eliminate leakage currents in transformerless three-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1360-1368.
- [7] KJAER S B, PEDERSEN J K, BLAABJERG F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [8] WU T F, SUN K H, KUO C L, et al. Combined unipolar and bipolar PWM for current distortion improvement during power compensation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1702-1709.
- [9] 杨达亮,卢子广,杭乃善,等. 三相电压型PWM整流器准定频直接功率控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(27):66-73.
YANG Daliang, LU Ziguang, HANG Naishan, et al. Novel quasi-direct power control for three-phase voltage-source PWM rectifiers with a fixed switching frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 66-73.
- [10] LI Quan, WOLFS P. A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1320-1333.
- [11] LEE S H, KIM K T, KWON J M, et al. Single-phase transformerless bi-directional inverter with high efficiency and low leakage current[J]. IET Power Electron, 2013, 7(2): 451-458.
- [12] GONZALEZ R, LOPEZ J, SANCHIS P, et al. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 693-697.

- [13] 刘斌,贺建军,栗梅,等. δ 算子离散化的二阶广义积分实现单相光伏逆变器并网控制[J]. 太阳能学报, 2015, 36(8): 1876-1883.
LIU Bin, HE Jianjun, SU Mei, et al. Control for single-phase photovoltaic grid connected inverter based on second order generalized integrator using delta operator[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(8):1876-1883.
- [14] 杨勇,赵春江. 分布式发电系统中并网逆变器比例谐振控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11):51-55.
YANG Yong, ZHAO Chunjiang. Proportional resonant control for grid connected inverters in distributed generation systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11):51-55.

作者简介:



刘斌

(E-mail:3177151@qq.com);

刘斌(1982—),男,湖南会同人,讲师,博士,研究方向为电力电子与变流技术(E-mail:bingo.liu@csu.edu.cn);

黄清宝(1978—),男,河南商丘人,副教授,通信作者,研究方向为复杂系统建模与优化、智能优化控制、新能源转化与控制

贺德强(1973—),男,湖南桃江人,教授,博士研究生导师,研究方向为轨道交通信息控制与故障诊断。

Reactive power injection modulation and direct power control strategy for HERIC single-phase grid-connected photovoltaic inverter

LIU Bin¹, HUANG Qingbao¹, HE Deqiang², SONG Shaojian¹, XU Chenhua¹, LIN Xiaofeng¹

(1. National Demonstration Center for Experimental Electrical Engineering Education, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: With the increasing of penetration level of renewable energy in single-phase grid, grid-connected single-phase PV(PhotoVoltaic) inverters need to meet the demands of reactive power compensation and flexible power factor control. Firstly, the transformer-less isolated single-phase PV inverters with HERIC(Highly Efficient and Reliable Inverter Concept) topology are studied, and the corresponding reactive power modulation strategy for HERIC inverters is proposed. Then, two-phase static coordinate system is constructed for single-phase PV inverter based on SOGI(Second-Order Generalized Integrator). The instantaneous power model of single-phase PV inverters is established based on the instantaneous reactive theory, and a novel direct power control strategy for HERIC inverters is realized. Finally, experimental results with a 5 kW prototype validate the effectiveness and feasibility of the proposed reactive power modulation and direct power control strategy.

Key words: HERIC; electric inverters; single-phase photovoltaic grid-connected inverter; reactive power modulation; direct power control; instantaneous reactive theory

(上接第132页 continued from page 132)

Unbalance fault-tolerant control strategy of modular multilevel photovoltaic grid-connected inverter

LIU Yiqi¹, LI Danhua², WANG Qingbo¹, SONG Wenlong¹, ZHENG Gang¹, XIE Wenhao³, WANG Jianze³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. Maintenance Branch Company, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400039, China;
3. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The average switch model of MMC(Modular Multilevel Converter) is built when hot backup is adopted as a fault-tolerant control. When the sub-module in MMC encounters fault, the rest sub-modules in MMC cannot support DC bus voltage, which results in interruption of the inverter operation. In terms of this problem, a novel fault-tolerant control strategy of bypassing the fault sub-module is proposed, which revalues the sub-module capacitor voltage and carrier phase-shift angle to maintain the main components of circulating current, while reducing the total harmonic distortion rate of grid current to enable the normal operation of MMC. The maximum power point tracking control strategy in fault tolerance is improved to solve the problem of long restore time when fault occurs. The simulation model of MMC is built by MATLAB/Simulink to prove the validity of the proposed control strategy.

Key words: photovoltaic grid-connection; modular multilevel converter; fault-tolerant control; circulating current; maximum power point tracking