

单相光伏并网系统共模电流分析

杨秋霞, 高金玲, 荣雅君, 任玉艳

(电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学), 河北省 秦皇岛市 066004)

Analysis on Common Mode Current of Single-Phase Grid-Connected PV System

YANG Qiuxia, GAO Jinling, RONG Yajun, REN Yuyan

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province (Yanshan University),
Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Common mode current problem is very important to grid-connected photovoltaic (PV) system and in German standard DIN VDE 0126-1-1, the stipulations related to the common mode current are specified. When common mode current exceeds specified value, the connected PV generation system should be cut off within the stipulated time. Considering the importance of common mode current to the connection of photovoltaic generation to power grid, a common mode current is built. It is known through the analysis that common mode current is related to modulation technology and the position where the inductance locates. In allusion to above-mentioned features, a new single-phase grid-connected PV system that can suppress common mode current is designed. The designed system is a full-bridge single-phase grid-connected PV system with AC bypass circuit and in which inductances are symmetrically arranged at both phase line and neutral line. Comparing with traditional full-bridge inverter systems adopting unipolar or bi-polar modulation technology, the structure of the proposed single-phase grid-connected PV system not only can eliminate common mode current produced in the grid-connected PV system, but also improve system efficiency and quality of current sent into power grid, thus the overall performance of the grid-connected PV system is improved. Results from theoretical analysis and simulation show that the proposed model and system are correct and available.

KEY WORDS: common mode current; photovoltaic grid-connected; AC bypass circuit; current sent into power grid

摘要: 共模电流问题是光伏并网系统中的一个重要问题, 德国 DIN VDE 0126—1—1 对共模电流做出了相关规定。当共模电流超过规定值时, 系统必须在规定的时间内断开。考虑到共模电流在光伏并网系统中的重要性, 建立了共模模型。通过分析可知, 共模电流与调制技术和电感的安放位置相关。针对上述特点, 设计了能够抑制共模电流的新型单相光

伏并网系统, 即带有交流旁路且电感对称分布在相线和中线上的全桥光伏并网系统。与传统的基于单极性调制技术和双极性调制技术的全桥逆变器系统相比, 此结构不但能消除系统产生的共模电流, 而且能提高系统效率和并网电流质量, 从而提高光伏并网系统的整体性能。理论分析和仿真结果验证了上述模型和系统的正确性和有效性。

关键词: 共模电流; 光伏并网; 交流旁路; 并网电流

0 引言

近年来, 分布式发电被提上了日程。分布式发电具有污染少、可靠性高、能源利用效率高、安装地点灵活等多方面优点, 有效解决了大型集中电网许多潜在问题。然而, 分布式电源发出的电能无法直接供给交流负荷, 须经一定的接口并网^[1-5]。分布式发电并网接口方式分电力电子逆变器接口和常规旋转电机接口 2 类, 前者在体积、重量、变换效率、可靠性、电性能等方面均优于后者, 因此, 光伏系统一般采用电压源型逆变器作为并网接口, 通过控制逆变器输出电流与电网电压同频同相实现单位功率因数并网发电。

早期的并网逆变器系统输出端一般安装工频隔离变压器, 实现电压调整和电气隔离, 以保证系统安全可靠运行^[6-8]。然而, 工频隔离变压器体积庞大, 成本高, 损耗大, 影响系统整机效率。相关文献提出在逆变器的直流侧加入高频变压器, 从而取代低频变压器^[9-10]。虽然高频变压器体积较小、成本较低、重量较轻, 但电能变换阶段是较复杂的, 整机效率也没有得到很好地改善。因此, 无工频隔离变压器的并网逆变器系统成为目前研究的热点。虽然去掉工频变压器可以使并网逆变器系统整体效率得到一定改善, 但却带来一些新的问题, 如共模电流和直流注入等^[11-23]。本文主要研究光伏系统

共模电流问题。为了消除共模电流，本文将提出新型的拓扑结构，这种结构使系统的整体性能得到改善。

1 单相光伏系统结构

光伏并网系统基本上由 1 套光伏阵列和 1 个逆变器构成，一般的单相光伏系统结构如图 1 所示。图中： U_d 为直流母线电压；N 为直流母线电压的负极； V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 代表开关器件绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)；A、B 点分别为逆变器每相输出中点；O 点为地； i_1 、 i_2 分别为逆变器每相输出电流； i_{cm} 为逆变器的共模输出电流； L 为滤波电感； u_{grid} 为电网电压； C_{PV} 代表光伏阵列和地之间的杂散电容； C_1 和 C_2 代表逆变器输出中点与地之间的杂散电容。

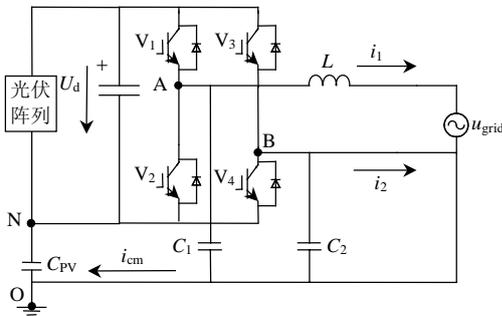


图 1 并网逆变器原理

Fig. 1 Schematic diagram of grid-connected inverter

共模电压的定义为：逆变器的输出中点对参考地的电位差的平均值。对于此系统，使用直流母线电压的负极(N 点)作为共同的参考点是非常方便的。因此，逆变器的共模电压为

$$u_{cm} = \frac{u_{AN} + u_{BN}}{2} \quad (1)$$

差模输出电压被定义为逆变器两端的输出电压，即

$$u_{dm} = u_{AN} - u_{BN} = u_{AB} \quad (2)$$

根据式(1)(2)可得，逆变器输出中点和 N 点之间的电压可以表示为

$$u_{AN} = \frac{u_{dm}}{2} + u_{cm} \quad (3)$$

$$u_{BN} = -\frac{u_{dm}}{2} + u_{cm} \quad (4)$$

全桥逆变器的共模输出电流定义为

$$i_{cm} = i_1 + i_2 \quad (5)$$

2 共模模型分析

由于逆变器输出中点对参考地的电压差为 u_{AN} 、 u_{BN} ，可以将其等效为频率是开关频率、振幅为直流母线电压的方波电压源。共模电流的一半通

过相线，另一半通过中性线，因此，电感的位置会影响共模电流。为了分析研究电感位置的影响，将电感分成 L_1 和 L_2 2 个相等的部分，如图 2 所示。

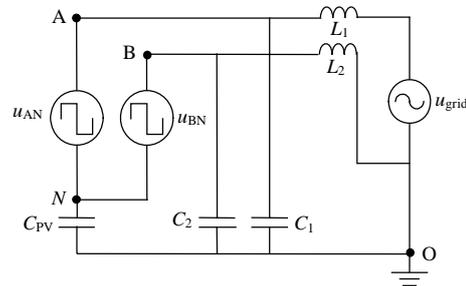


图 2 并网逆变器系统模型

Fig. 2 Grid-connected inverter system model

为了建立更加简便的模型分析共模问题，图 2 还需进一步改进，含有差模和共模电压的并网逆变器系统模型如图 3 所示。图 3 中用共模电压和差模电压代替图 2 中的方波电压源。

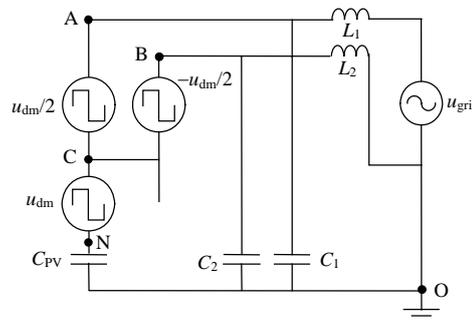


图 3 含有差模和共模电压的并网逆变器系统模型

Fig. 3 Grid-connected inverter system model with differential and common mode voltages

由于电网的频率远低于开关频率，因此，由电网引起的共模电流可以忽略不计，然后在点 C 和 O 之间引入等效电路，可以得到图 4 的模型。

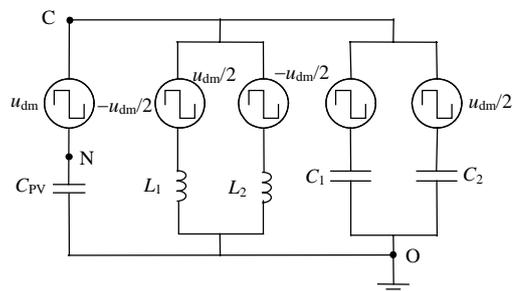


图 4 并网逆变器系统的等效模型

Fig. 4 Equivalent model of grid-connected inverter system

根据戴维南定理，由图 4 可以进一步得到图 5。

图 5 中： $u_{dx1} = \frac{L_1 - L_2}{2(L_1 + L_2)} u_{dm}$ ； $u_{dx2} = \frac{C_1 - C_2}{2(C_1 + C_2)} u_{dm}$ 。

由于多数情况下，逆变器的输出点是对称的，这样可以假设输出中点对地的杂散电容是相似的，因此 u_{dx2} 接近于 0，即使逆变器的输出点是不对称的，

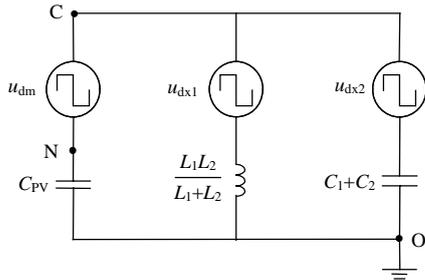


图 5 并网逆变器系统的共模模型

Fig. 5 Common mode of grid-connected inverter system

由于与 C_{PV} 相比, C_1 和 C_2 数值很小, 因此, 在中低频率范围内 u_{dx2} 对共模电流的影响预计要比 u_{dx1} 和 u_{cm} 小得多, 如果忽略 u_{dx2} 的支路, 最终将得到图 6 所示的电路。图中 u_{zcm} 为点 M 和点 N 的端电压。这个简单的电路的主要优点是可以方便地分析和理解某一调制技术和电感位置对共模电流的影响。由图 6 可以直接得出一个结论: 当总的共模电压 u_{zcm} 恒定不变时, 由于 C_{PV} 存在, 电路将不会有共模电流流过。

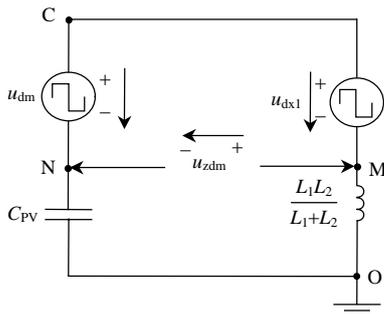


图 6 并网逆变器系统的简化共模模型

Fig. 6 Simplified common model for grid-connected inverter system

3 调制技术分析

3.1 双极性调制技术

由表 1 所示的双极性调制特性可以看出, 共模电压恒定保持不变。由图 6 可知, 若想让总的共模电压 u_{zcm} 保持不变, 特殊情况下可以让 u_{cm} 保持恒定不变, 让 u_{dx1} 恒等于 0, 由此可以得到易于实现的方案, 即逆变器采用双极性调制技术, 电感对称分别分布在相线和中线上($L_1=L_2$), 但是此方案有一个缺点就是效率较低, 由于在每个开关周期都有 2 组 IGBT 以开关频率运行, 因此, 对于同样的输出

表 1 双极性调制下的逆变器输出电压($L_1=L_2$ 且 $u_{dx1}=0$)

Tab. 1 Inverter output voltage with bipolar modulation ($L_1=L_2$ 且 $u_{dx1}=0$)

V_1	V_2	V_3	V_4	u_{AN}	u_{BN}	u_{dm}	u_{cm}	u_{zcm}
导通	关断	关断	导通	U_d	0	U_d	$U_d/2$	$U_d/2$
关断	导通	导通	关断	0	U_d	$-U_d$	$U_d/2$	$U_d/2$

频率, 开关损耗是单极性的 2 倍。此外, 由于双极性调制开关频率等于输出频率, 考虑到输出频率越高, 并网电流质量越高, 输出频率增高会增加开关损耗, 效率与并网电流质量之间的协调平衡性较差。由此而知, 若不考虑效率问题, 采用双极性调制技术时, 若想总的共模电压保持恒定不变, 必须将电感分成 2 个相等的部分分别分布在相线和中线上, 否则由于 2 种状态下差模电压不同, 总的共模电压将发生变化, 如表 2 所示。

表 2 双极性调制下的逆变器输出电压($L_1=L$)

Tab. 2 Inverter output voltage with bipolar modulation ($L_1=L$)

V_1	V_2	V_3	V_4	u_{dm}	u_{cm}	u_{dx1}	u_{zcm}
导通	关断	关断	导通	U_d	$U_d/2$	$U_d/2$	0
关断	导通	导通	关断	$-U_d$	$U_d/2$	$-U_d/2$	U_d

3.2 单极性调制技术

对于普通的单极性调制技术, 在输出电压的正半周期, V_1 保持通态, V_3 和 V_4 交替通断。由此可知, 即使电感分成 2 个相等的部分分别分布在相线和中线上($u_{dx1}=0$), 共模电压 u_{cm} 也以开关频率在 U_d 和 $U_d/2$ 之间不断变化, 在负半周期同理。

3.3 单极性倍频式调制技术

目前, 单极性倍频式调制技术广泛应用于全桥逆变器中, 因为其差模电压的输出频率是开关频率的 2 倍, 即在较低的开关频率下可获得较好的并网电流质量, 这改善了开关损耗与并网电流质量之间的不平衡性。下文分析这种调制技术应用于无变压器结构的光伏系统的实用性。

在表 3 中, 电感全部连接到相线上, 在这种情况下, 在差模电压的正半周期, 共模电压有 3 个电压阶跃, 而总的共模电压有 2 个电压阶跃, 负半周期同理。表 4 相当于表 3 的特殊情况, 电感分成 2

表 3 单极性倍频式下的逆变器输出电压($L_1=L$)

Tab. 3 Inverter output voltage with unipolar modulation ($L_1=L$)

V_1	V_2	V_3	V_4	u_{AN}	u_{BN}	u_{dm}	u_{cm}	u_{zcm}
导通	关断	关断	导通	U_d	0	U_d	$U_d/2$	0
导通	关断	导通	关断	U_d	U_d	0	U_d	U_d
关断	导通	关断	导通	0	0	0	0	0

表 4 单极性倍频式下的逆变器输出电压($u_{dx1}=0$)

Tab. 4 Inverter output voltage with unipolar modulation ($u_{dx1}=0$)

V_1	V_2	V_3	V_4	u_{AN}	u_{BN}	u_{dm}	u_{cm}
导通	关断	关断	导通	U_d	0	U_d	$U_d/2$
导通	关断	导通	关断	U_d	U_d	0	U_d
关断	导通	关断	关断	0	0	0	0

个相等的部分分别分布在相线和中线上,即 $u_{dx1}=0$, 但是共模电压仍然是变化的。此调制技术虽然在效率和并网电流质量方面有优越的性能,但是不能消除共模电流,因此,此调制技术不适用于无变压器光伏系统。

3.4 带有交流旁路的全桥逆变器系统

图 7 给出了包括交流旁路逆变器的无变压器光伏系统。此时,电能变换器包括全桥结构和没有使用全桥开关的交流旁路,交流旁路通过晶体管 V_5 、 V_6 及其反并联二极管结构来实现。为分析这种电能变换器的性能,必须先确定开关器件允许的导电状态,为避免造成直流侧电压短路,以下的开关组合不允许同时导通: $V_1 \rightarrow V_2$ 、 $V_1 \rightarrow V_6 \rightarrow V_4$ 、 $V_3 \rightarrow V_4$ 、 $V_3 \rightarrow V_5 \rightarrow V_2$ 。

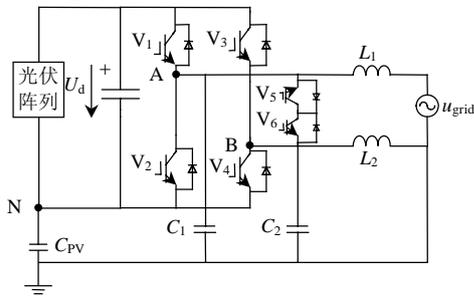


图 7 带有交流旁路的系统结构

Fig. 7 System structure schematic with AC bypass

同样地,若分析共模问题,必须知道由电能器的共模电压和与等效电压源 u_{dx1} 相关的差模电压。由表 5 可看出,在差模电压的正半周期内, V_1 和 V_4 与 V_5 轮流导通,当 V_1 和 V_4 同时导通时,光伏系统向电网输送电能, V_1 和 V_4 关断时,光伏系统通过 V_5 和 V_6 的反并联二极管续流,由于输出被交流旁路短路,所以 u_{AN} 和 u_{BN} 是相同的。由此可知,差模电压为 0,此时,因全桥的所有开关器件都关断,逆变器的输出与直流侧是断开的,所以 u_{AN} 和 u_{BN} 看似理论上无法估算的,但实际上,开关器件存在杂散电容,利用此电容就可以推算出输出电压。若全桥,则开关器件的杂散电容是相似的,关断过程是对称的,此时每个 IGBT 两端承受的电压是直流电压的一半,因此,共模电压是直流电压的一半。在差模电压的负半周期, V_2 和 V_3 、 V_6 的反

表 5 带有交流旁路的全桥逆变器输出电压($u_{dx1}=0$)

Tab. 5 Inverter output voltage with AC bypass ($u_{dx1}=0$)

V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	u_{dm}	u_{cm}
导通	关断	导通	关断	关断	关断	U_d	$U_d/2$
关断	关断	关断	关断	导通	关断	0	$U_d/2$
关断	导通	关断	关断	关断	关断	$-U_d$	$U_d/2$
关断	关断	关断	导通	关断	导通	0	$U_d/2$

并联二极管轮流导通,原理与在正半周期内相同, V_6 与 V_5 一样,两端承受的电压均为直流电压的一半。从差模电压的整个周期来看,共模电压 u_{cm} 始终保持恒定不变,恒等于 $U_d/2$,因此,若要使总的共模电压保持恒定不变,必须将电感分成 2 个相等的部分分别分布在相线和中线上。然而,当电感全分布在相线上时,由于差模电压变化,总的共模电压不断变化,共模电流会产生。因此,本文提出的可行方案为带有交流旁路的全桥逆变器与电感对称分布在相线和相线上相配合使用,如表 5 所示。

与单极性倍频式调制技术相比,带交流旁路的全桥要想得到与前者相同的差模电压的输出频率,开关频率必须是前者的 2 倍,但由于带交流旁路的全桥结构参加换流的开关器件承受的电压均为直流电压的一半,而单极性倍频式调制开关器件换流时,开关器件承受的电压为直流侧电压。因此,带有交流旁路结构的开关损耗与具有相同的输出频率的单极性倍频式调制的全桥相似,而小于基于全桥的双极性调制下的开关损耗。关于通态损耗,输出电流流过 2 个 IGBT 或 1 个 IGBT 和 1 个二极管,通态损耗也与具有相同的输出频率的单极性倍频式调制全桥相似。因此,带有交流旁路的全桥逆变器光伏系统不但能很好地消除共模电流,而且与双极性调制相比,效率和并网电流的质量都得到了很好地改善,它分别具备了单极性调制和双极性调制技术的优点,同时又克服了单极性调制和双极性调制各自的缺点。

4 仿真结果与分析

本文采用 Matlab/Simulink 7.1 进行仿真,系统参数如下:电网电压有效值为 220 V,电频率为 50 Hz,直流侧母线电压为 400 V,开关频率为 20 kHz,总的滤波电感为 20 mH,光伏阵列与地之间的杂散电容为 100 nF。图 8—13 是通过软件仿真后的结果。从图 8 可以看出,双极性调制下的共模电压为 200 V,是直流电压的一半,当电感对称分布在相线和中线上时,共模电流为 0,如图 9 所示。然而,当电感全分布在相线上时,共模电流不但幅值较大,而且还含有丰富的谐波成分,这因为总的共模电压是共模电压和差模电压的函数。当采用单极性倍频式调制时,共模电压有 3 个电压跃变,如图 11 所示。由此得出结论:无论电感怎么安放,在这种调制技术下,一定会产生共模电流。由图 12

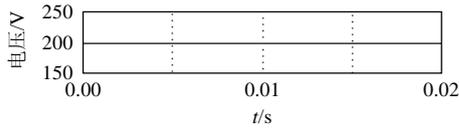


图 8 双极性调制的共模电压波形
Fig. 8 Common-mode voltage waveform with bipolar modulation

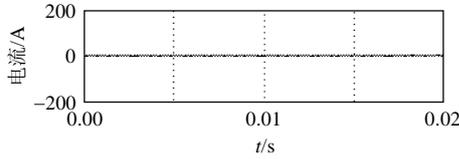


图 9 双极性调制的共模电流波形($L_2=L_1$)
Fig. 9 Common-mode current waveform with bipolar modulation ($L_2=L_1$)

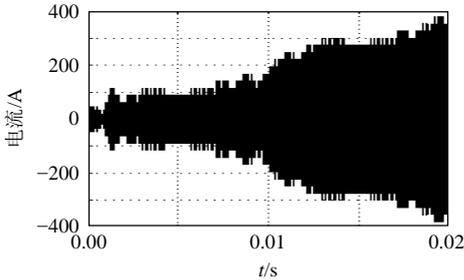


图 10 双极性调制的共模电流波形($L_1=L$)
Fig. 10 Common-mode current waveform with bipolar modulation ($L_1=L$)

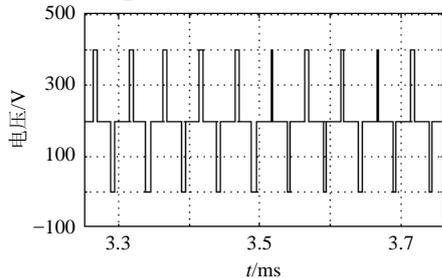


图 11 单极性倍频式调制的共模电压波形
Fig.11 Common-mode voltage waveform with unipolar modulation

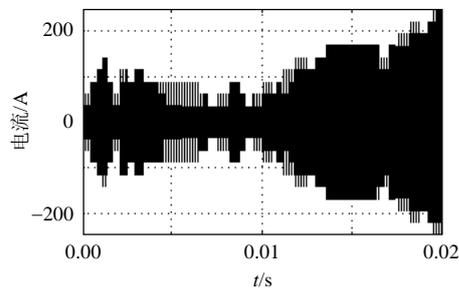


图 12 单极性倍频式调制的共模电流波形($L_1=L$)
Fig.12 Common-mode current waveform with unipolar modulation ($L_1=L$)

和 13 对比可以看出，电感对称分布在相线和中线上时产生的共模电流比电感全部连接在相线时小得多，原因主要是前者产生总的共模电压在差模电压的半个周期内有 2 个电压级，而后者有 3 个电压级，从而使各次谐波的幅值都变小。带有交流旁路

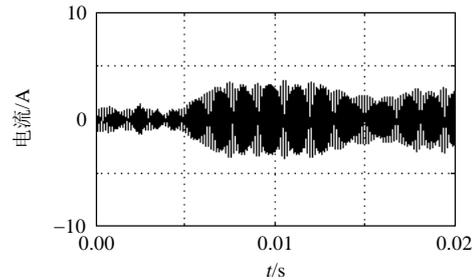


图 13 单极性倍频式调制的共模电流波形($L_2=L_1$)
Fig.13 Common-mode current waveform with unipolar modulation ($L_2=L_1$)

的全桥结构产生的共模电压和共模电流与采用双极性调制($L_2=L_1$)的仿真结果相同。

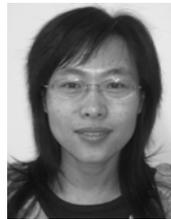
5 结论

以往的逆变器拓扑结构和调制技术不能消除共模电流，因此逆变器的拓扑结构和调制技术将出现新的变化。对于单相的光伏发电系统，本文建立了相关的共模模型。从模型可以看出，电感的安放位置和调制技术影响着共模电流。通过分析和比较单极性调制技术和双极性调制技术，本文提出了带有交流旁路的全桥光伏并网系统，此结构具有单极性调制技术和双极性调制技术各自的优点，在共模电流、效率和并网电流质量等系统整体性能上得到了较大提高。

参考文献

- [1] Xue Y, Chang L, Kjaer S B, et al. Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: an overview[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1305-1314.
- [2] Sharma R. Removal of DC offset current from transformerless PV inverters connected to utility[C]//40th International Universities Power Engineering Conference. Cork, Ireland, 2005: 1-6.
- [3] Myrzik J M A, Calais M. String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems:a review[C]//IEEE Power Technology Conference. Bologna, Italy, 2003: 1-8.
- [4] Kjaer S B, Pedersen J K, Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters in photovoltaic modules[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [5] Yuan X, Merk W, Stemmler H, et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(2): 523-532.
- [6] Raymond M H, Michael R. Design considerations for three-phase grid connected photovoltaic inverters[C]//29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. New Orleans, United States: IEEE Electron Devices Society, 2002: 1396-1401.
- [7] Chung S K. A phase tracking system for three phase utility interface inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(3): 431-438.
- [8] Tusitha A, Johnson C M. Suppression of line voltage related distortion in current controlled grid connected inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(6): 1393-1401.
- [9] Ye Z H, Kolwalkar A, Zhang Y, et al. Evaluation of anti-islanding

- schemes based on nondetection zone concept[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1171-1176.
- [10] Green M A. Consolidation of thin-film photovoltaic technology: the coming decade of opportunity[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2006(14): 383-392.
- [11] 张强, 张崇巍, 张兴, 等. 风力发电用大功率并网逆变器研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 54-59.
Zhang Qiang, Zhang Chongwei, Zhang Xing, et al. Study on grid-connected inverter used in high-power wind generation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 54-59(in Chinese).
- [12] 刘伟, 彭冬, 卜广全, 等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 1-6.
Liu Wei, Peng Dong, Bu Guangquan, et al. A survey on system problems in smart distribution network with grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 1-6(in Chinese).
- [13] 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.
Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18(in Chinese).
- [14] 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): 71-76.
Liu Yanghua, Wu Zhengqiu, Tu Youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76(in Chinese).
- [15] 姚志垒, 王赞, 肖岚, 等. 一种新的逆变器并网控制策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 61-64.
Yao Zhilei, Wang Zan, Xiao Lan, et al. Research on a novel grid-connected control strategy of inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 61-64(in Chinese).
- [16] Gonzalez R, Lopez J, Sanchis P, et al. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 693-697.
- [17] 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.
Li Bin, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88(in Chinese).
- [18] 赵晶晶, 李新, 许中, 等. 含分布式电源的三相不平衡配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 94-98.
Zhao Jingjing, Li Xin, Xu Zhong, et al. Calculation of three-phase unbalanced power flow in distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 94-98(in Chinese).
- [19] 袁超, 曾祥君, 邓丰, 等. 应用边界保护原理提高分布式发电系统并网协调性的方法[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 62-68.
Yuan Chao, Zeng Xiangjun, Deng Feng, et al. An approach to improve interconnection coordination of distributed power generation system by boundary protection principle[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 62-68(in Chinese).
- [20] 林霞, 陆于平, 王联合, 等. 含分布式电源的配电网智能电流保护策略[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 82-89.
Lin Xia, Lu Yuping, Wang Lianhe, et al. An intelligent current protection strategy for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 82-89(in Chinese).
- [21] 孙鸣, 余娟, 邓博, 等. 分布式发电对配电网线路保护影响的分析[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 104-107.
Sun Ming, Yu Juan, Deng Bo, et al. Analysis of impact of DGs on line protection of distribution networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 104-107(in Chinese).
- [22] 丁明, 严流进, 茆美琴, 等. 分布式发电中燃料电池的建模与控制[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 8-13.
Ding Ming, Yan Liu Jin, Mao Meiqin, et al. Modeling and control of fuel cells in distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 8-13(in Chinese).
- [23] 吴俊. 分层分布式安全稳定控制系统[J]. 电网技术, 2009, 33(S1): 278-280.
Wu Jun. Research of hierarchical distributed safety and stability control system[J]. Power System Technology, 2009, 33(S1): 278-280(in Chinese).



杨秋霞

收稿日期: 2010-05-13.

作者简介:

杨秋霞(1972), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统控制、光电检测等方面的研究,

E-mail: yangqx_fly@163.com;

高金玲(1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为逆变器并网控制技术, E-mail: gao.shirao@163.com.

(责任编辑 杜宁)