

光伏发电系统软开关并网研究

袁继敏¹, 李小玲¹, 魏建国², 曹太强³

- (1. 攀枝花学院 计算机学院, 四川 攀枝花 617000;
2. 四川盛唐实业有限公司, 四川 成都 610106;
3. 四川玻璃股份有限公司, 四川 自贡 643200)

摘要: 针对传统硬开关并网瞬间产生冲击电流且并网时间过长等问题, 提出使用双向晶闸管(TRIAC)并网的控制策略。其工作原理是: 当控制器检测到光伏逆变器输出的交流电压与电网电压同频、同相时, 对光伏逆变器输出的交流电压和电网电压分别采样并进行有效值的差值运算, 当二者的有效值幅度差近似为零时, 立即给 TRIAC 以触发电压并使其导通, 使光伏系统的电能输送给电网, 达到并网的目的。通过理论分析和仿真验证了该方法的正确性和控制的有效性。

关键词: 软开关; 并网; 光伏系统; 功率传输; 双向晶闸管

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0085-04

随着光伏产业的迅猛发展, 光伏系统正在由独立运行向并网发电方向发展, 可再生能源并网发电技术已经成为研究的热点。如何有效地适时并网以及并网后控制并网电流的相位、大小以达到单位功率因数、最大功率跟踪、电力系统继电保护和防止孤岛效应的作用, 这是光伏发电系统并网及并网运行的首要条件。

另外, 再生能源系统发出的交流电无论作为备用电源还是为电网提供电能, 除了要求控制光伏系统发出的交流电的相位、频率和幅度与电网一致以外, 并网时间也是并网成功与否的关键。特别是作为备用电源, 当检测到电网停电时, 若光伏备用电源并网时间过长, 就达不到备用电源的目的, 会造成系统崩溃。同样, 并网时间过长, 由于并网存在的冲击电流将会给系统带来很多不利的因素。

对此, 提出了软开关并网的方法, 该方法能解决硬开关并网存在的问题。同时分析了电网频率波动的原因、逆变器并网运行的条件、相应的解决方法及并网功率的实时传输等^[1-4]。

1 软开关并网分析

在实际应用中, 并网连接通常是采用硬开关, 然而光伏发电系统与电网之间的硬开关连接要适时控制。在现有的文献报道中是通过工频变压器和机械开关(如接触器)向电网传输电能的, 但是用变压器升压隔离, 并用接触器作为隔离开关, 此方式必须先吸合接触器, 才能判断电网是否正常, 若电网不正常, 则需将接触器断开, 结果造成接触器频繁动作。大功率变压器的频繁通断不仅对电网造成电流冲击, 而且

接触器开、关频繁瞬间的大电流将造成接触器吸合时产生电弧并烧坏触点, 从而导致并网时接触器触点接触不良产生缺相。如果夜间接触器在电网上不脱离, 则变压器的空载会长期耗电。另外, 依据 IEEE2000-929^[5]和 UL1741^[6]标准, 所有并网逆变器输出的交流电压不仅须与电网电压同频、同相, 而且必须具有继电保护和防孤岛效应的功能。防孤岛效应的关键是对电网断电时要适时地检测并快速脱离电力网。硬开关自身特点是动作时间和脱开时间较长, 如果系统出现故障或孤岛效应, 即适时地检测到电力网的故障, 由于硬开关响应速度较慢, 将造成接触器还没有脱开时光伏系统已经崩溃或损坏。因此, 这种硬开关并网装置存在很多缺陷, 不易控制, 浪涌电流大, 甚至无法并网。而软开关并网技术既有缩短并网时间、隔离和防止并网时的冲击大电流的作用, 也具有防止孤岛效应的作用。单相软开关并网电路图如图 1 所示, 光伏 DC/AC 逆变产生的交流电压是检测电网电压的频率、相位和幅度并通过 SPWM 调制出来与其相等的交流电。此时, 当检测到光伏输出的交流电压与电网电压同步时, 就给双向晶闸管触发信号, 并通过光伏系统的最大功率输出确定晶闸管导通角 α 的大小。因此, 光伏软开关并网控制解决了硬开关并网实时性差、并网电流冲击大的缺陷, 同时通过控制晶闸管导通角的大小控制光伏系统的最大功率输出, 达到了光伏并网的目的。图 2 是三相光伏软开关并网示意图。

2 光伏发电功率控制与传输

并网的目的是把太阳能电池产生的最多电能输送给电网。而并网发电必须保证并网瞬间逆变器输出的交流电压与电网电压、频率、相序一致, 因此, 并

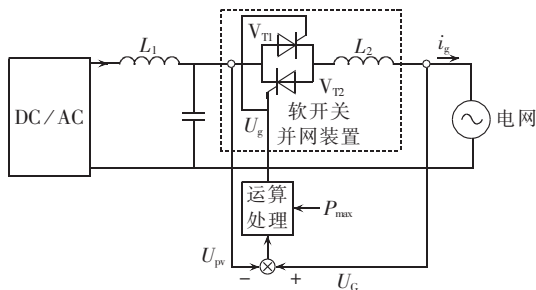


图 1 单相软开关并网拓扑电路

Fig.1 Circuit of single-phase soft-switching grid-connection topology

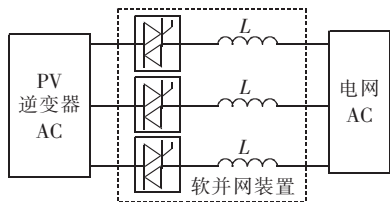


图 2 三相光伏发电软并网示意图

Fig.2 Three-phase soft-switching grid-connection topology

网前应采集电网电压、频率、相位等参数,并将电网电压信号作为逆变器的调制信号使逆变器输出电压与电网电压的波形一致。在此条件下,逐步改变逆变器调制信号使逆变器输出电压相位超前或者控制幅度,从而控制输出电流逐步增大向电网输送的有功功率或无功功率,以达到最大功率跟踪。

下面将分析在并网前如何控制光伏逆变器输出的交流电压与电网电压同频、同相以及并网成功后如何传输功率。

2.1 频率的锁定跟踪

为了分析频率的跟踪,先分析电网频率扰动的原因。电力系统的电能大部分是由水力发电或火力发电的同步电机提供的,而发电机组的一次调频功能对维持电网频率的稳定至关重要。一次调频是指当电网频率偏离额定值时,发电机组调节控制系统自动控制机组有功功率的增加(频率下降时)或减少(频率升高时),以使电网频率迅速回到额定值范围。在电力系统运行中,系统频率不可能一直维持在额定频率,每秒都在变化,一般在 $50 \times (1 \pm 0.5) \text{ Hz}$ 左右变化。如图 3 所示,发电机组以额定频率 f_a 运行时,其输出功率为 P_a ;当系统负荷增加而使频率下降到 f_b

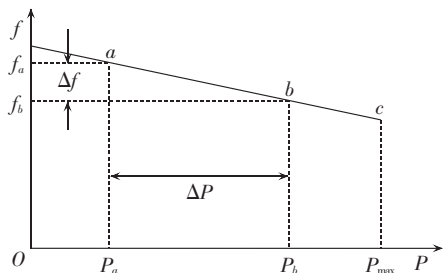


图 3 发电机组的功率-频率特性

Fig.3 Power-frequency characteristic of dynamotor

时,发电机组由于调速系统的作用,使输出功率增加到 P_b 。如果原动机的调节汽门(或导水翼)的开度已达到最大位置(相当于图中的 c 点),则即使频率再下降,发电机组的输出功率也不会增加。由于电网的负载随时在发生变化,从图 3 中可以看出,电网频率是在一定范围内波动的。因此,光伏发出的电要输送到电网,其频率必须与电网频率保持同步。

锁相环是自动追踪输入信号频率和相位的闭环控制系统,在并网系统中用锁相环控制能使光伏发电系统输出的交流电的频率与电网频率保持一致。如图 4 所示,通过采样电路对电网频率采样后,再倍频并与压控振荡器的频率进行比较,由数字鉴相器鉴频、鉴相得到误差电压,经过数字压控振荡器(DCO)后得到高精度的电网频率 f ,并跟踪锁定电网频率。

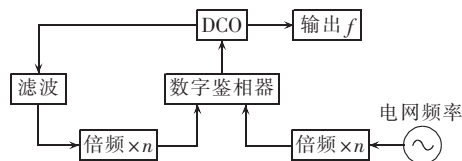


图 4 光伏发电数字锁相环框图

Fig.4 Digital PLL of PV system

电网频率锁定后,该频率作为光伏逆变器调制波的频率,如图 5 所示,这样经过逆变出来的脉冲波并通过 LC 滤波后的交流电压与电网的频率和相位相等^[7-11]。

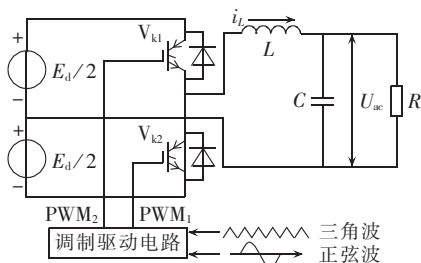


图 5 单相并网逆变控制电路图

Fig.5 Control circuit of single-phase grid-connected inverter

2.2 光伏发电功率传输

光伏并网与火力发电和水力发电的同步电机并网不一样,同步发电机投入电网并联运行有 2 种方法:一种是准确同步法;另一种是自同步法。用准确同步法投入电网虽然可以避免合闸时产生的巨大冲击电流,但是要达到以上的并网条件需要较长的时间进行调整;自同步投入并网,必须事先知道相序的正确性,虽然并网的时间短,但是合闸瞬间有冲击电流。从以上分析可知,在并网时需要注意的是并网时间要短,并网时应减小冲击电流。在光伏发电系统中,不但要使三相逆变器的调制波的相序分别与电网相序一致,还要使三相调制波的频率与电网频率相等,这是并网的第一步。然后,利用光伏系统检测到太阳能电池输出的最大功率来控制逆变器开关管导通的占空比,从而实现最大功率点跟踪,并且通过触发晶

闸管的导通实现软开关并网。可把最大的功率送入给电网,达到同步发电机2种并网方法的优点,满足电网负载的需要^[12-14]。

并网电流的控制可分为间接电流控制和直接电流控制。间接电流控制也称幅相控制,即功率传输控制,即通过调节逆变器交流侧的幅度和相位达到控制输出电流的目的。间接电流控制结构简单,稳定性好,但存在动态性能差、响应慢等问题,对于电网电压波形畸变引起的电流谐波也缺乏抑制能力。而直接电流控制通过电流检测和反馈调节实现电流误差和波形的控制。光伏发电系统并网后,控制光伏发电的交流电与电网电压的相位差,以调节有功;控制光伏发电的交流电的幅度,以调节无功,如图6所示。

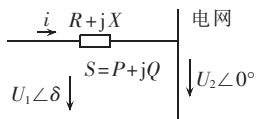


图6 单相逆变器并网的等效电路图

Fig.6 Equivalent circuit of single-phase grid-connected inverter

对单相并网电路的分析(图6中),假设电网的相位为零,光伏逆变器输出的交流电压相对于电网的相位为 δ ,则复功率如式(1)所示。

$$S = U_2 I_2^* = U_2 \angle 0^\circ \left(\frac{U_1 \angle \delta - U_2 \angle 0^\circ}{jX} \right)^* = U_2 \left[\frac{U_1 (\cos \delta - U_2) + j U_1 \sin \delta}{jX} \right]^* = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta + j \frac{1}{X} (U_1 U_2 \cos \delta - U_2^2) = P + jQ \quad (1)$$

由式(1)可得:

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \quad (2)$$

$$Q = \frac{U_1 U_2 \cos \delta - U_2^2}{X} \quad (3)$$

式(2)(3)分别是光伏发电系统向电网输送的有功、无功功率大小。从式(2)中还可以看出,向电网输送功率的大小与其相位差 δ 有关,当 δ 越大向电网输送的有功功率就越多, δ 越小向电网输送的无功功率就越多,同时通过改变 δ 的相位差的正、负就能改变潮流;式(3)中,当 $Q > 0$ 时为感性无功,当 $Q < 0$ 时为容性无功,改变 δ 的大小不能改变潮流,只有通过改变幅度的大小才能改变潮流。

3 仿真分析

在并网时大多采用三相逆变器并网,为分析方便,对单相并网软开关进行分析,如图1所示^[7]。其工作原理是:当检测到光伏逆变器输出的交流电压与电网电压同频、同相时,对光伏逆变器输出的交流电压和电网电压分别采样并进行有效值的差值运算,当二者的有效值幅度差近似为零时,给 TRIAC 以触发电压并使其导通。因此,如果电网由于某种原因

停电时,系统就检测到电网和逆变器输出的交流电压的幅度差不接近于零,或者近似为电压的有效值,此时,控制系统将停止对 TRIAC 的触发,从而使光伏系统迅速从电网中脱离,防止了孤岛效应的产生。

对图2用 PSIM 仿真软件进行仿真分析。在图2中的电抗器 L 用来限制电网电压突变和操作过电压引起的电流冲击。平滑电源电压中包含的尖峰脉冲,更主要的是平滑 TRIAC 触发时产生的电压缺陷,它既能阻止来自电网的干扰,又能减少光伏逆变器产生的谐波电流对电网的污染。

图7中 u_1, u_2, u_3 是光伏逆变器经过滤波后的仿真交流电压波形, u_4, u_5, u_6 是经过 TRIAC 触发后还没有经过电感 L 滤波的交流电压波形,其触发角为 15° 。从图中可以看出,由于滤波电感的作用,经过 15° 触发后的交流电压能保持同频、同相;图8中的仿真波形 u_1, u_2, u_3 是电网电压, u_7, u_8, u_9 是经过 TRIAC 电抗器滤波后的交流电压,二者之间存在电压的相位差,这个相位差的大小可以根据逆变器调制波的相位改变而改变。

图9是光伏系统并网电压($u_7 \sim u_9$)和电流($i_1 \sim i_3$)的波形,从图中可见,电流与电压的相位相同,实现了高功率因数,达到了并网的目的。

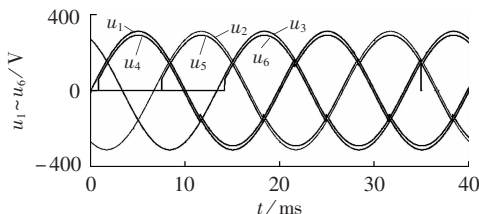


图7 光伏输出交流电压与 TRIAC 触发后的仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms of inverter output voltage and TRIAC output voltage

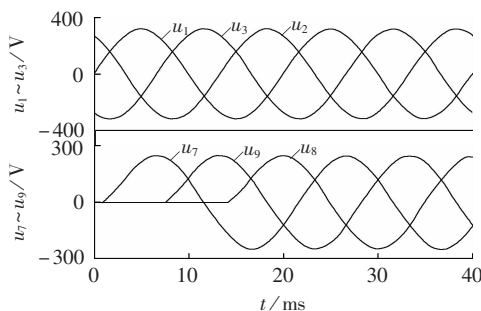


图8 逆变器输出电压与并网电压的仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms of grid-connection voltage and inverter output voltage

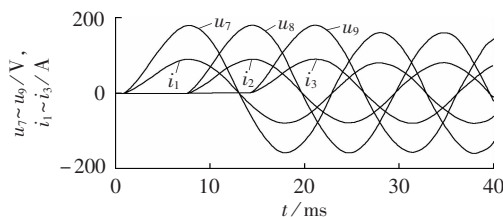


图9 并网电压与并网电流的仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms of grid-connection voltage and current

4 结论

用硬开关方法并网,在实际应用中效果差,虽然逆变器能控制交流电压的相位和幅度,但直接并网逆变器产生的谐波会与电网的谐波叠加,导致系统谐波成分多、含量大,影响系统的正常工作,严重时损坏逆变器,甚至可能造成电网电流向光伏发电系统反送市电,损坏光伏发电系统。

本文提出了软开关并网方法,该方法能够隔离光伏发电与电网之间的干扰,控制实现简单,系统稳定,能够防止孤岛效应和冲击电流,缩短了并网时间,也能够可靠地按照电网的需求将光伏发出的电能输送给电网。

参考文献:

- [1] 张国新. 风力发电并网技术及电能质量控制策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 130-133.
ZHANG Guoxin. Parallel-in technology of wind power and power quality control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 130-133.
- [2] 温步瀛, 江岳文, 陈冲. 风电场并网运行的无功补偿优化问题[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 42-46.
WEN Buying, JIANG Yuewen, CHEN Chong. Reactive power compensation optimization for grid-connected wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 42-46.
- [3] 汪海宁, 苏建徽, 丁明, 等. 光伏并网功率调节系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 75-79.
WANG Haining, SU Jianhui, DING Ming, et al. Photovoltaic grid-connected power conditioner system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 75-79.
- [4] 丁明, 王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 31-36.
DING Ming, WANG Min. Distributed generation technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 31-36.
- [5] WU L B, ZHAO Z M, LIU J Z. A single-stage three-phase grid-connected photovoltaic system with modified MPPT method and reactive power compensation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(4): 881-886.
- [6] SALVADOR A, SERGIO B M, JOSEP B, et al. Interfacing renewable energy sources to the utility grid using a three-level inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1504-1511.
- [7] SHEN Guoqiao, XU Dehong, CAO Luinget. An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1899-1906.
- [8] HUNG Guokiang, CHANG Chihchang, CHEN Chernlin. Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(1): 169-173.
- [9] 张雷, 谷海涛, 鄂春良, 等. 失速型风力发电机组软并网技术研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 35-38.
ZHANG Lei, GU Haitao, E Chunliang, et al. Soft cut-in technology for stall-regulated wind turbine generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 35-38.
- [10] 王飞, 余世杰, 苏建徽, 等. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 72-74, 91.
WANG Fei, YU Shijie, SU Jianhui, et al. Research on photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 72-74, 91.
- [11] 赵剑飞, 姜建国. 基于3台单相逆变器的三相并网系统[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 59-63.
ZHAO Jianfei, JIANG Jianguo. Three-phase grid-connected system based on three single-phase inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 59-63.
- [12] CHEN Yang, SMEDLEY Keyue. Three-phase boost-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2301-2309.
- [13] JOERG D, WESSELS C, FUCHS F W. Limitations of voltage-oriented PI current control of grid-connected PWM rectifiers with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 380-388.
- [14] LO Yukang, LEE Tingpeng, WU Kuanhung. Grid-connected photovoltaic system with power factor correction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 2224-2227.

(编辑: 汪仪珍)

作者简介:

袁建敏(1969-), 男, 四川遂宁人, 教授, 博士, 主要从事测试、控制、信号处理和神经网络应用研究;

李小玲(1969-), 女, 四川乐山人, 教授, 硕士, 主要从事测试、控制、信号处理;

魏建国(1975-), 男, 四川遂宁人, 工程师, 主要从事电力电子技术、楼宇自动化研究;

曹太强(1969-), 男, 四川富顺人, 博士研究生, 主要从事大功率开关电源控制研究(E-mail: c-t-q815@126.com)。

Soft-switching technology of grid-connected photovoltaic system

YUAN Jimin¹, LI Xiaoling¹, WEI Jianguo², CAO Taiqiang³

(1. School of Computer Science & Technology, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;

2. Sichuan Shengtang Co., Ltd., Chengdu 610106, China;

3. Sichuan Glass Co., Ltd., Zigong 643200, China)

Abstract: Aiming at the surge current and long paralleling time of conventional grid-connection by hard switching, the control strategy of grid-connection with TRIAC is proposed. The working principle is as followings: when the output AC voltage of photovoltaic inverter and the power grid voltage, which are detected by the controller, have the same frequency and phase, they are then sampled respectively for RMS calculation; when their difference is near zero, the TRIAC is then triggered on to connect the photovoltaic system to power grid. Its correctness and effectiveness are verified by the theoretical analysis and simulations.

Key words: soft-switching; paralleling; photovoltaic system; power transmission; TRIAC