

太阳能电网与市政电网联合供电能量控制研究

提出了一种在太阳能电网与市政电网联合供电系统下能实现平滑、无逆流切换,并且优先使用清洁能源太阳能的能量控制策略。针对传统联合供电系统中的接触器开关电路,提出了一种新的联合供电拓扑结构,有效减少了系统切换过程中对太阳能电网和市政电网的冲击。采用了联合供电模式下控制太阳能电网逆变器输出端电流相位和重复控制,并加入电网电压前馈的复合控制方案,保证了太阳能电网与市政电网无逆流联合供电,并且优先使用清洁能源太阳能。实验结果证明了该控制方案的有效性。

肖 辉¹ 席自强² 张长征² 肖 钊¹ / 1. 国网黄冈供电公司 2. 湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心

0 引言

目前,随着世界各国范围内能源危机的爆发,全球能源都面临着巨大的压力与挑战,在此大环境下,类似太阳能、风能和潮汐能等可再生能源成为一支新秀,逐步得到人们的亲睐^[1]。但这些可再生能源在给予负载端能量消耗时却无法保证长期稳定的输出供给,这便使得可再生能源在发展端遇到巨大的阻力,同时也导致可再生能源在缓解世界性能源危机上面的功效大打折扣。

在所有可再生能源中,太阳能具有取之不尽、用之不竭等优点,是十分理想的清洁资源。为了使太阳能光伏所发电能得到充分的利用,同时确保负载工作的稳定,就必须在太阳能光伏供电系统的基础之上提供额外的后备电源。传统的太阳能供电系统中后备能源采用蓄电池组,不仅系统构造复杂,成本较

高,而且废旧电池容易对环境产生严重污染,而市政电网则不会存在上述问题,因此在有市政电网的条件下应以市政电网作为后备电源^[2-3]。文献[4]提出了一种采用接触器投切的控制方式来实现太阳能电网与市政电网的联合供电,但该种控制模式下仅仅只能保证负载的基本供电,在接触器频繁投切过程中还容易对电网产生冲击,影响市政电网系统的稳定运行。文献[5]提出了一种在直流侧并网的太阳能电网与市政电网的联合供电技术,在该种模式下无法确保在太阳能微电网系统有功率输出时最大程度地利用太阳能。

本文提出了一种新的太阳能电网与市政电网无逆流联合供电系统的能量控制策略,其中包括太阳能电网与市政电网联合供电系统的硬件拓扑结构和系统的能量控制策略。在所提出的新型拓扑结构下,采用控制太阳能电网逆变器输出端的电流相位,并加入电网电压前馈控制和重复控制相结合的复合控制方式来实现整个供电系统的能量控制^[6-8],既保证了可再生能源太阳能的优先、充分和高效利用,同时不向市政电网馈电,不对市政电网系统电能造成任何影响,还能实现负载长期、持续、稳定和高效的工作。

1 无逆流联合供电系统拓扑设计

1.1 传统联合供电系统结构

图1给出了另外一种常见太阳能电



肖 辉/助理工程师

关键词/Keywords

联合供电 ·
无逆流 ·
能量控制 ·
重复控制 ·
电压前馈 ·

武汉市科技局应用基础研究项目
(2013010501010140)。

网与市政电网联合供电控制系统，将市政电网电能经功率因数校正变换器变换成直流电，然后再与太阳能电网端的DC/DC变换器的输出并联，共同向直流负载端提供电能。此种供电模式下虽然能保证太阳能电网所发电能不会向市政电网端逆流，但是无法保证优先使用太阳能电网所发电能。并且国内用电负载的需求大多为220 V交流电，因此该供电系统实用性不强。

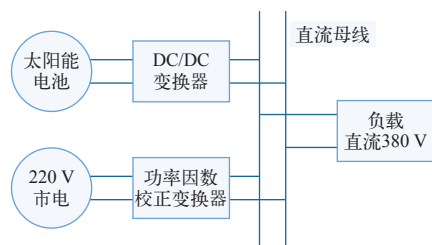


图1 太阳能和市电联合供电系统 I

1.2 新型联合供电系统结构

本文提出了一种新的太阳能电网与市政电网无逆流联合供电系统，硬件连接结构如图2所示。

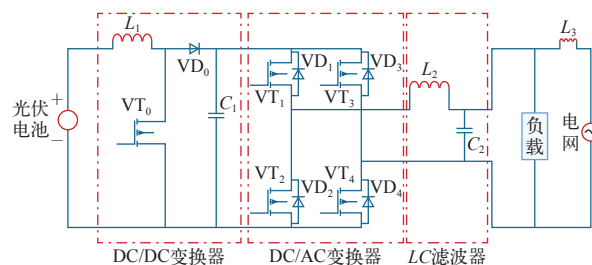


图2 太阳能和市电联合供电系统 II

该系统不采用接触器等开关器件硬连接，而采用 LC 与负载直接软耦合，通过对相位的控制来实现功率的匹配调节。有效避免了接触器投切时对市政电网产生的影响，可以平滑进行不同工作模式之间的转换，同时保证了清洁能源太阳能的优先使用。并且由于此种工作模式下太阳能电网端任何时刻均不会向市政电网端馈电，所以不会

对市政电网端的电能质量构成任何影响^[9]。

2 能量控制策略

2.1 模糊自整定 PI 控制

在太阳能电网和市政电网联合供电系统中，能量控制的可靠性将直接影响整个系统的稳定性。在常见的光伏发电系统中，PI 控制、重复控制以及电网电压前馈控制都是控制效果比较理想的控制策略。PI 控制中最重要的两个参数即为比例系数和积分系数。

比例系数可以体现系统对误差信号的敏感程度，比例系数越大，对误差信号越敏感；比例系数越小，系统越稳定。相应增大便可以减小整个系统误差，改善整个控制系统的稳态特性，但是会降低系统相对稳定性。而且随着它的增大，系统的超调量也会进一步增大。如果取值过小，虽然系统稳定性会上升，但却会导致动态特性变差。综上所述，比例系数的取值要根据系统的需要折中选取合适的值。

积分系数有累计和记忆功能，对误差信号进行累加，其作用是减小静态误差，因此增大可以提高系统稳定性。尽管适当增大可以提高系统相对稳态性能，但如果过大，则会在响应过程初期出现积分饱和的现象，即起不到明显的调节作用，所以针对不同系统需要选取不同的合适参数。

若控制系统中控制电流相位的电流环只采用 PI 控制器进行调节，其结构如图3所示^[10]。

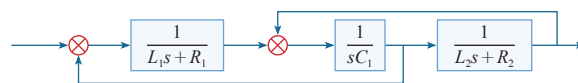


图3 PI控制单独作用下的结构框图

其中 PI 控制器为 $(K_p s + K_i)/s$ ，逆变部分为 K_{PWM} 。系统开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} K_{PWM} \frac{1}{L_1 L_2 C_1 s^3 + (L_1 R_2 C_1 + L_2 R_1 C_1) s^2 + (R_1 R_2 C_1 + L_1 + L_2) s + (R_1 + R_2)} \quad (1)$$

通过具体实验测试来确定合适的比例系数和积分系数。首先是对比例系数进行选择，增大比例系数即增大控制器增益，提高了系统的开环增

益，减小了系统相应的稳态误差，系统的控制准确度也得到了相应的提高，但降低了系统的相对稳定性，甚至可能造成闭环系统的不稳定，所以

选择参数不宜过大,经实验验证后这里取为0.3;其次是对积分系数进行选择,增大积分系数,能够改善系统的相对稳态性能,降低系统稳定性的不利影响,经实验验证后这里取为103。

2.2 重复控制

重复控制的基本思想来源于控制理论中的内模原理。内模原理是将作用在整个系统外部信号的动力学数学模型移植到控制器内来构成一个准确度较高的反馈控制,于是此系统的输出就能够对参考的输入信号实现无静差跟踪。因而重复控制是一种能将包含在稳定闭环内的周期性误差全部消除的控制方案,控制性能优越。常用的重复控制系统如图4所示。

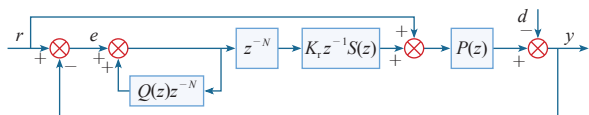


图4 常用重复控制系统框图

图中, r 为系统给定的参考正弦信号; e 为误差信号; d 为扰动信号; $P(z)$ 为SPWM逆变器; y 为实际输出电压; $Q(z)$ 为带限滤波器; $S(z)$ 为重复控制环路的补偿器; z^{-N} 为周期延时环节; N 为在一个基波周期内采样的次数; K_r 为可调增益^[11]。

重复控制的基本思路是假定前一个周期里所出现的基波波形畸变将同样会在下一基波周期的同一时间内再次出现,于是控制器就根据给定的信号和反馈的信号之间的误差信号来确定系统所需要得到的校正信号,然后在下一个基波周期内的同一时间将此校正信号叠加到原来的控制信号上,用来消除系统后面各周期中出现的重复性畸变。

扰动输入 $d(k)$ 跟踪误差 $e(k)$ 传递函数为

$$\begin{aligned} F(z^{-1}) &= E(z^{-1}) / D(z^{-1}) \\ &= \frac{1}{1 + \frac{1}{1 - Q(z^{-1})z^{-N}} z^{-N} K_r z^{-1} S(z^{-1}) P(z^{-1})} \\ &= \frac{1 - Q(z^{-1})z^{-N}}{1 - [Q(z^{-1}) - K_r z^{-1} S(z^{-1}) P(z^{-1})] z^{-N}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $E(z^{-1})$ 和 $D(z^{-1})$ 分别是 $e(k)$ 和 $d(k)$ 的 z 变换式。

相应的频率函数为

$$\begin{aligned} F(j\omega) &= F(z^{-1}) \\ z &= e^{j\omega T} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, T 为采样周期。

若假定 $Q(z^{-1}) = 1$, 且 $P(z^{-1})$ 是稳定的, 则

$$F(j\omega) = \frac{1}{1 - [1 - K_r e^{j\omega k T} S(j\omega) P(j\omega)] e^{-j\omega N T}} \quad (4)$$

参考指令是周期 $T_s = NT$ 的正弦信号, 扰动输入 $d(k)$ 的周期与参考指令周期相同, 相应傅里叶级数中的角频率可表示为 $\omega = 2\pi m / (NT)$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), 因此

$$\begin{aligned} F(j\omega) &= \frac{1 - e^{-j2\pi m}}{1 - [1 - K_r e^{j2\pi m k / N} S(j\omega) P(j\omega)] e^{-j2\pi m}} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

由式 (5) 可以看出, 重复控制器对任何频率低于乃氏频率 $1/(2T)$ 的周期扰动, 其稳态误差均为零。

2.3 电压前馈控制

未加上电压前馈控制的并网控制系统结构框图如图5所示。

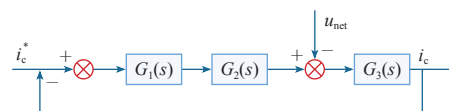


图5 未加电压前馈的并网控制系统框图

太阳能光伏并网发电系统的实质是将光伏电池产生的直流电能逆变成为交流电能,属于有源逆变系统。因此,该系统极易因为电网系统内部的变化而产生相应的波动,系统的输出并网电流就会进一步发生相应的畸变,不满足国家有关规定的并网标准。

由图5可知,当电网端电压变化 Δu 时,系统并网电流也会相应发生变化,输出即为

$$\Delta i_c = \frac{G_3(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \Delta u_{net}(s) \quad (6)$$

由式 (6) 可以看出,当电网电压突变时,并网系统的输出电流将会随之变化,进而会使系统失去稳定性。为了消除由于电网电压不稳定而对整个系统稳定性的影响,必须采取有效的措施来

抑制这种变化。

本文将电压前馈调节环节加入到太阳能光伏并网系统中,以此来改善整个系统的稳定性。增加了电压前馈控制的太阳能光伏并网控制系统结构框图如图6所示。

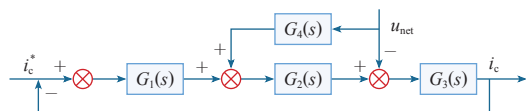


图6 电压前馈并网控制系统框图

由图6可知,系统在加入电网电压前馈调节环节之后,可以得到相应的电流变化为

$$\Delta i_c = \frac{G_3(s)[G_2(s)G_4(s)-1]}{1+G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \Delta u_{net}(s) \quad (7)$$

如果令 $G_4(s) = 1/G_2(s)$, 则式(7)中等号右边的部分可以消除,从而可以消除电网电压突变对整个系统造成的影响。通过增加一个电压前馈控制环节,来给出与电网电压相对应的合适占空比,从而消除由于电网电压变化对整个系统的影响。

2.4 复合控制

控制电流输出相位的模糊自整定PI控制虽然能够使系统拥有较好的动态特性,但是其控制能力较为有限。重复控制虽然可以保证输出的信号能够准确跟踪给定的信号,但是重复控制得到的控制信号并不能够立即输出,而是必须要滞后一个参考周期才能输出。如果此时系统内部已经出现干扰,那么消除干扰信号对输出的影响就至少需要一个参考周期,而此时系统无法对干扰信号产生任何调节作用,那么这一个周期内系统就几乎处于开环控制状态,控制系统的动态性能也将会受到严重影响。而电网电压前馈控制的加入能够使系统在免受电网电压波动影响的同时,还可以适当减小控制系统的增益,有利于系统稳定性的进一步提升。

本文提出将模糊自整定PI控制、重复控制和电网电压前馈控制相结合,组成复合控制。利用模糊自整定PI控制来合理改善系统的动态特性,利用重复控制来合理改善系统的稳态特性,利用电网电压前馈控制来消除电网电压变化对系统的影响。

3 实验验证

为进一步验证该联合供电系统控制策略的准确性,研制了一套基于TI公司DSP芯片(TMS320F28335) 3 000 V·A的原理样机。逆变器输入电压600 V,开关频率 $f = 20$ kHz,开关管选用Infineon公司型号FF100R12KS4的IGBT,其主要参数为:耐压值1 200 V,额定电流100 A,电网电压 $u_g = 220$ V,频率 = 50 Hz。

系统在仅由电流相位控制和重复控制下,所得并网波形如图7所示。

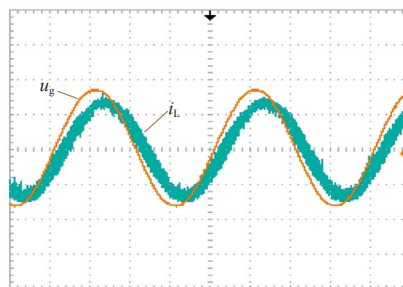


图7 电网电压和并网电流波形 I

系统在仅由电网电压前馈控制和重复控制下,所得并网波形如图8所示。

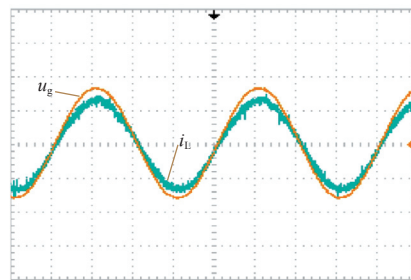


图8 电网电压和并网电流波形 II

系统在由电流相位控制、电网电压前馈控制和重复控制的复合控制下,所得并网波形如图9所示。

对比图7~图9不难看出,当系统仅仅采用电流相位控制和重复控制,或仅仅采用电网电压前馈控制和重复控制时,所得到的并网波形均不太理想。而当系统采用电流相位控制、电网电压前馈控制和重复控制相结合的复合控制时,系统并网波形得到较大改善。

在太阳能电网与市政电网联合供电系统运行

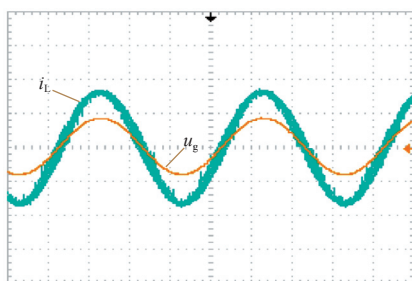


图9 电网电压和并网电流波形 III

过程中, 负载端采用三路模拟电阻负载, 每路电阻阻值为 $40\ \Omega$, 额定功率为 $2.5\ \text{kW}$, 实际工作电压有效值为 $220\ \text{V}$, 实际工作功率为每路 $1.2\ \text{kW}$ 。当负载端消耗功率为单路 $1.2\ \text{kW}$ 时, 小于太阳能电网端的最大发电功率 $3\ \text{kW}$ 。为了优先使用清洁能源太阳能, 并保证无逆流供电, 此时应通过合理能量控制策略使负载端消耗功率全部由太阳能电网端输出功率来提供, 市政电网端所提供的输出功率为 0 。并网后市政电网端电压、电流和太阳能电网端电流波形如图10所示。

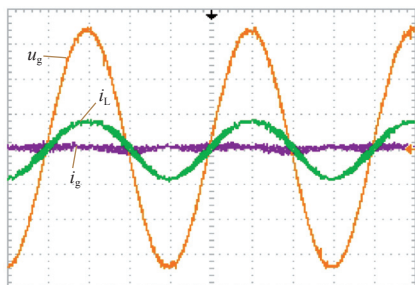


图10 电网电压、电网电流和并网电流波形 I

随着系统负载端消耗功率的增加, 使太阳能电网端的输出功率和市政电网端的输出功率均发生相应的变化。当负载端消耗功率为两路 $2.4\ \text{kW}$ 时, 由于负载端消耗功率没有超过太阳能电网端的输出最大功率 $3\ \text{kW}$, 为了优先使用清洁能源太阳能, 并保证无逆流供电, 此时应通过合理能量控制策略使负载端消耗功率仍然全部由太阳能电网端输出功率来提供, 而市政电网端的输出功率始终为 0 。并网后市政电网端电压、电流和太阳能电网端电流波形如图11所示。

随着系统负载端消耗功率的继续增加, 太阳能电网端的输出功率和市政电网端的输出功率也会进一步发生相应的变化。当负载端消耗功率为

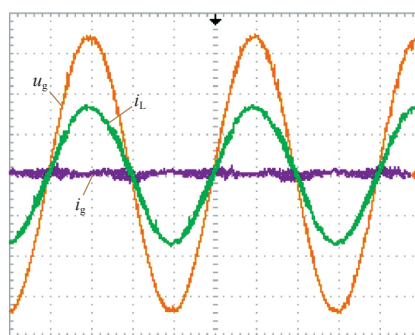


图11 电网电压、电网电流和并网电流波形 II

三路 $3.6\ \text{kW}$ 时, 在光照条件不变的情况下, 太阳能输出端的最大功率仍为 $3\ \text{kW}$ 。由于负载端消耗功率超过太阳能电网端的输出最大功率 $3\ \text{kW}$, 此时为了满足负载的稳定、持续工作, 并且保证优先使用清洁能源太阳能, 实现无逆流供电, 应通过合理的能量控制策略使太阳能电网端的输出功率仍保持为最大值 $3\ \text{kW}$, 余下不足的 $0.6\ \text{kW}$ 再由市政电网端的输出功率来提供。并网后市政电网端电压、电流和太阳能电网端电流波形如图12所示。

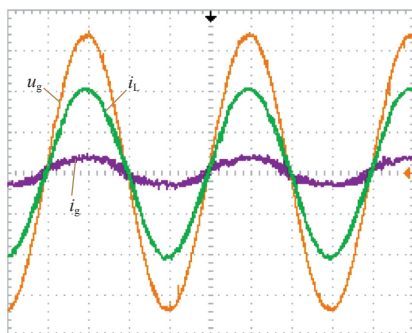


图12 电网电压、电网电流和并网电流波形 III

4 结束语

针对传统的太阳能电网与市政电网联合供电系统中的切换电路, 提出了一种新型联合供电的并网电路拓扑结构, 有效减少了系统切换过程中对太阳能电网和市政电网的冲击, 实现了平滑、无逆流切换。系统控制部分采用了合理的能量控制策略, 确保了两个电源的协同工作, 使太阳能电网与市政电网无逆流联合供电, 并且可以优先使用清洁能源太阳能, 使太阳能资源得到最大化的利用。最后实验结果表明, 所提出的能量控制

策略具有良好的控制效果。

参考文献

- [1] Nigim K A, Zobaa A F. Development and opportunities of distributed generation fuelled by renewable energy sources [J]. International Journal of Global Energy Issues, 2006, 26 (3) : 215-231.
- [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] Khanh L N, Seo J J, Kim Y S, et al. Power-management strategies for a grid-connected PV-FC hybrid system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (3) : 1874-1882.
- [4] 丁南菊. 太阳能光伏市电互补控制逆变一体机设计 [J]. 中国新技术新产品, 2013 (24) : 2-5.
- [5] 张春龙, 邵丽华, 戴未然. 光伏与市电联合供电系统的能量管理控制 [J]. 南通大学学报: 自然科学版, 2012 (3) : 5-10.
- [6] 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.
- [7] 王赞, 肖岚, 姚志垒, 等. 并网独立双模式控制高性能逆变器设计与实现 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1) : 54-59.
- [8] 张鹏, 金海, 等. 基于 PI+ 重复控制的光复并网逆变器设计 [J]. 船电技术, 2011, 31 (8) : 48-51.
- [9] 吴振兴, 邹云屏, 张允, 等. 单相PWM整流器输入电流波形的改善技术 [J]. 高电压技术, 2008, 3 (34) : 603-608.
- [10] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (2) : 100-107.
- [11] Kwang Soon Lee, Wangyun Won, Jay H Lee. Synthesis of run-to-run repetitive control methods using finite impulse models [J]. Science Direct on Journal of process control, 2009, 19 (2) : 364-369.

(收稿日期: 2015-10-11) EA

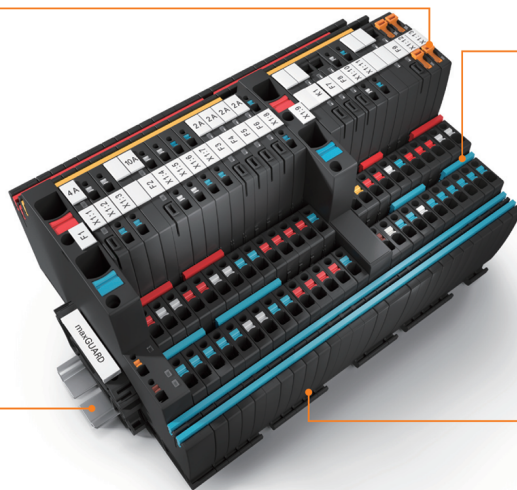


实用的测试杆

电源分配端子具有测试杆, 可对负载回路进行手动通、断, 用于线路试验或检测。

满足特殊定制需求

丰富的产品型号, 多样的分线端子和附加组件能够始终确保提供客户特殊需求的解决方案。



适用横联件

可通过横联件进行负载监控回路连接, 减轻负载监控和分线端子之间的接线任务。



节省大量空间

电子负载监控和分配器, 单片6.1 mm宽。



Weidmüller 

魏德米勒maxGUARD电子熔丝 ——负载监控与电压分配一体解决方案

魏德米勒创新的maxGUARD能够自动排除故障, 易于维护, 组成控制电压分配系统。maxGUARD系统整合了以往需独立安装的电子负载监测输出中的等电位分配端子, 是24V DC电压控制分配系统的完整解决方案, 帮助用户有效的节省时间、增加失效保护安全性、节省高达50%的端子导轨空间。

魏德米勒电联接(上海)有限公司

电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.