

孙 磊,索雪松,张 梦,等.一种新型农业纳网 DC-DC 变换器的研究[J].江苏农业科学,2017,45(6):211-215.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.06.055

一种新型农业纳网 DC-DC 变换器的研究

孙 磊,索雪松,张 梦,申艳路

(河北农业大学机电工程学院,河北保定 071001)

摘要:针对农村电网具有负载种类复杂多变、使用无规律、受大电网波动影响较大等特点的问题,本研究提出了农业纳网的概念,将发电、储能、控制系统及负载结合成整体,看作大电网的一个负载,使其可以与大电网并网运行,也可以在大电网出现故障时主动与电网断开孤网运行,从而保证对农村用户的持续可靠供电。并提出了一种新型 LLC 谐振式 DC-DC 变换器,使农业纳网发电系统能够在较宽的负载范围内向用户及储能系统高效供电,从而适应农村负载特性。最后研制了一台 5 kW 功率等级的变换器样机,通过试验验证本研究所提出变换器的有效性。

关键词:农业纳网;谐振式;变换器;宽负载;光伏发电系统

中图分类号: S24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)06-0211-05

随着农业机械化与农业智能化的不断发展,农村用电问题越来越受到广大农业用户的关注。农村电网具有负载种类复杂多变、私接线路较多、农机具功率大小不一、使用无规律等特点,因而使其对电网要求较高。农村电网作为电力系统组成部分,与大电网具有较强的动态紧密性,当大电网出现波动或故障时,农村电网也会受到较大影响,从而导致农村生产生活用电出现问题^[1-2]。由于农村所处地理位置常常远离城区,交通不便,因电网或线路故障导致的停电问题往往得不到及时修复,从而给农村居民生产生活带来极大的困扰。

为了解决大电网异动时给用户带来的停电问题,近年来,业内专家、学者对分布式发电的微电网进行了深入、广泛的研究。微电网自身具备发电与储能系统,在大电网正常工作时运行于并网状态,在大电网故障时运行于孤网状态,能够持续保持供电^[3-6]。然而微电网的功率等级多见于几百乃至几千千瓦,对于普通农业用户来说过大,且微电网发电系统占地面积及规模较大,对于地貌复杂的农村,特别是山地村落,建设兆瓦级微网发电系统显得不切实际。

近年来,国外学者提出了极微型电网(Nano-Grid)的概念,本研究称之为纳网^[7-8]。纳网与容量为数千到数兆瓦的微网的不同之处是其功率等级多在 2~100 kW 之间。其发电系统多为小型光伏电池、小型风力发电机等,占地面积较小,在国外研究中常见于住宅持续供电系统,国内相关研究基本处于起步阶段,尚无农业纳网相关研究文献。

本研究提出农业纳网概念,将发电、储能、控制系统及负载结合成整体,看作大电网的一个负载,使其可以与大电网并

网运行,也可以在大电网出现故障时主动与电网断开孤网运行,从而保证对农村用户的持续可靠供电。功率变流器是连接大电网、纳网与负载的桥梁,其拓扑结构与控制策略是纳网能否可靠运行,供电能否与负载合理匹配的关键^[9-10]。因而功率变流器是纳网研究的核心。

农业纳网采用直流母线形式,由发电系统通过单向 DC-DC 变换器向纳网注入能量,给负载提供电能,高效可靠的 DC-DC 变换器是实现纳网能量传递的关键^[11]。LLC 谐振式 DC-DC 变换器具有不需要辅助网络即可实现软开关的特性,能在较宽的输入电压范围和负载范围内实现原边开关管零电压开通(ZVS)和副边整流管零电流关断(ZCS),传输效率高且体积小^[12-15],适用于农业纳网等工作稳定性及效率有一定要求的环境。

本研究提出了一种新型 LLC 谐振式 DC-DC 变换器,能够在较宽的负载范围内实现能量的高效传输,从而适应农业纳网负载多变、私接负载过重等方面的特点,高效可靠地保证农村生产生活用电,最后研制了一台 5 kW 功率等级的 DC-DC 变换器,通过试验验证了本研究所提出的变换器的有效性。

1 农业纳网系统结构

光伏发电是分布式发电的典型代表,其区别于风力发电、水力发电等可再生能源发电之处在于光伏发电不受地域及地理资源影响,适用范围较广,成本较低。因此本研究选择光伏发电系统作为农业纳网的发电电源,其结构如图 1 所示。

由图 1 可知,农业纳网主要包括光伏发电模块、并网模块、储能模块与农村负载部分。各模块向负载供电优先级可按如下划分:第 1 级为光伏发电模块,第 2 级为并网模块,第 3 级为储能模块。首先由光伏发电模块通过单向 DC-DC 变换器向负载供电,当发电量超过负载需求时通过双向 DC-DC 变换器向储能模块充电,充满后再通过并网模块 AC-DC 变换器向大电网馈电,并可根据馈电量获得国家补贴。当由于天气、光照等原因造成发电不能满足负载需求时,由大电网通过并网模块向负载供电。若大电网出现异常时,纳网与大

收稿日期:2016-04-27

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(编号:2015AA050603)。

作者简介:孙 磊(1989—),男,河北保定人,硕士,助教,主要从事农业电气化与自动化、电力电子与电力传动方面的研究。E-mail:slsls10811@126.com。

通信作者:索雪松,硕士,副教授,主要从事农业电气化与自动化、农村电网方面的研究。E-mail:13903120861@163.com。

电网断开进入孤网运行状态,由发电模块或储能模块向负载供电。由此可见,农业纳网能够使农业负载用户在大电网正常或故障状态时均可持续用电,并能够通过并网模块向大电网馈电获得国家补贴,增加农民收入。

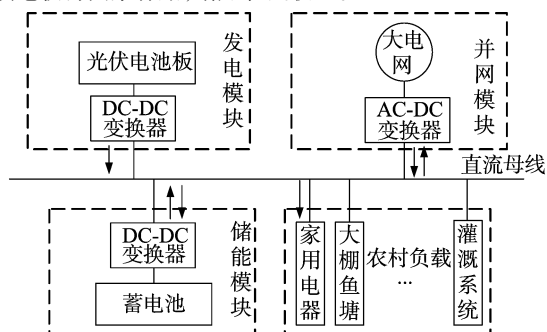


图1 农业纳网结构

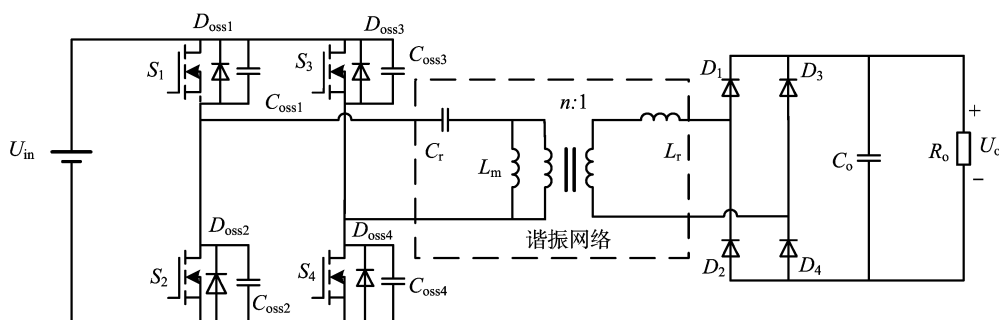


图2 DC-DC变换器结构

变换器理想工作波形如图3所示。变换器每个工作周期可分为8个工作状态,由于变换器2组桥臂完全对称且按50%占空比交替导通,因而上半周期与下半周期工作原理完全相同,本研究只对前半周期工作原理进行叙述。

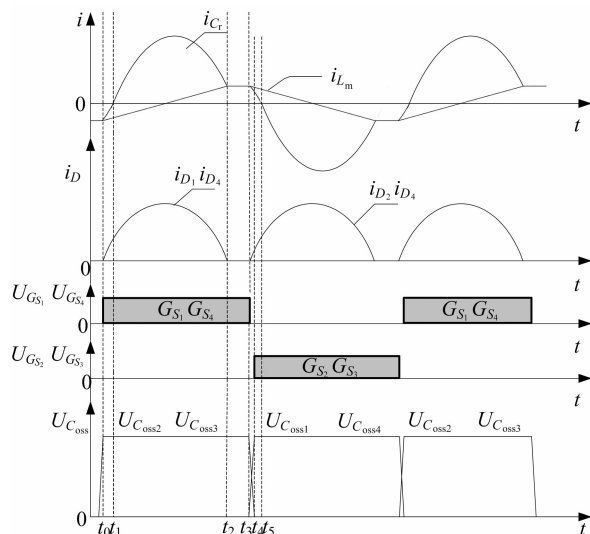


图3 DC-DC变换器理想工作波形

各阶段工作电路工作状态如图4所示。具体工作原理如下:

工作阶段1 $[t_0, t_1]$: t_0 时刻寄生电容 C_{oss1} 、 C_{oss4} 端电压为0,即开关管 S_1 、 S_4 端电压为0, t_1 时刻谐振网络电流 i_c 回升为

作为第1优先级供电的光伏发电模块,单向DC-DC变换器作为连接直流母线及的桥梁,其性能及对农村大波动负载适应能力的强弱直接关系到农业纳网能否在并网、孤网2种模式下实现能量的高效传输。

2 新型DC-DC变换器

2.1 新型DC-DC变换器工作原理

本研究提出的 LLC 谐振式 DC-DC 变换器拓扑结构如图2所示,变换器工作时给开关管 $S_1 \sim S_4$ 加入占空比为50%互补导通的方波驱动信号,实现逆变功能。谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 与变压器励磁电感 L_m 构成谐振网络,逆变后电压经谐振网络传递到副边,再经过二极管 $D_1 \sim D_4$ 不控整流向负责输出直流电压。

0,且之前 S_1 、 S_4 已获得开通信号(即 G_{s1} 、 G_{s4} 为高电平),因而实现零电压开通(ZVS)。此阶段 L_m 电压被钳位于 nU_o ,副边整流二极管 D_1 、 D_4 开通, D_2 、 D_3 关断。

工作阶段2 $[t_1, t_2]$:此阶段 S_1 、 S_4 正向导通,谐振网络电流 i_c 变为正向,励磁电感 L_m 支路电流 i_{L_m} 线性上升,从 t_2 时刻开始 $i_c = i_{L_m}$, D_1 、 D_4 自然关断。

工作阶段3 $[t_2, t_3]$:此阶段 $i_c = i_{L_m}$,原副边脱开,原边不向副边传递能量,仅 C_r 、 L_m 参与谐振。

工作阶段4 $[t_3, t_4]$:开关管 S_1 、 S_4 关断, C_{oss1} 、 C_{oss4} 进行充电, C_{oss2} 、 C_{oss3} 放电,到 t_4 时刻寄生电容充放电完成,则 S_1 、 S_4 端电压上升为输入电压, S_2 、 S_3 端电压下降为0,为下半周期零电压开通做好准备。

2.2 新型DC-DC变换器工作特性

本研究提出的 LLC 谐振式 DC-DC 变换器改变了传统 LLC 谐振变换器的谐振网络结构,其交流等效电路如图5所示。

R_{ac} 为实际负载 R_o 变换到一次侧的交流等效负载,为

$$R_{ac} = n^2 \frac{8}{\pi^2} R_o = n^2 \frac{8}{\pi^2} \frac{U_o^2}{P_o} \quad (1)$$

当负载较轻,即 R_{ac} 数值较大时, R_{ac} 支路相当于开路,仅谐振电容 C_r 与励磁电感 L_m 参与谐振,其谐振频率为

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_m C_r}} \quad (2)$$

当负载较重,即 R_{ac} 数值较小时,谐振电容 C_r 、谐振电感 L_r 与励磁电感 L_m 共同参与谐振,其谐振频率为

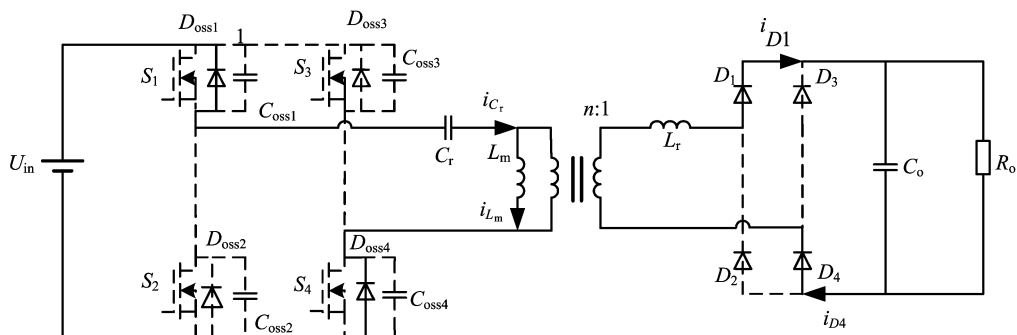
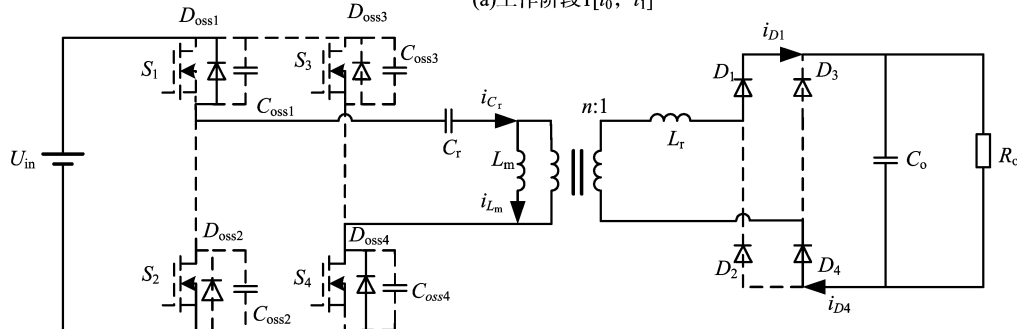
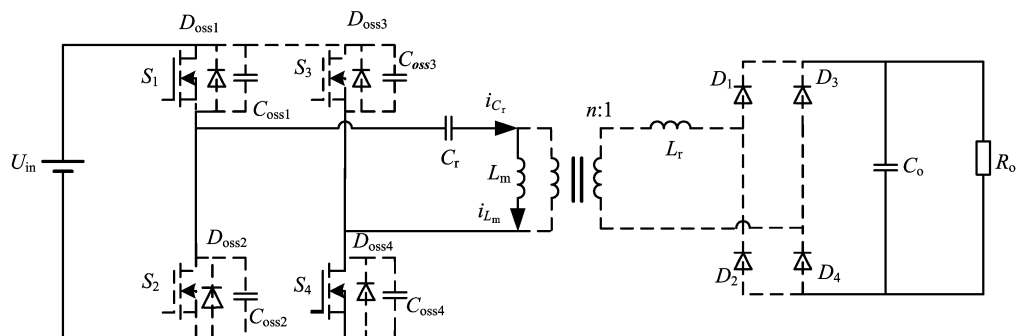
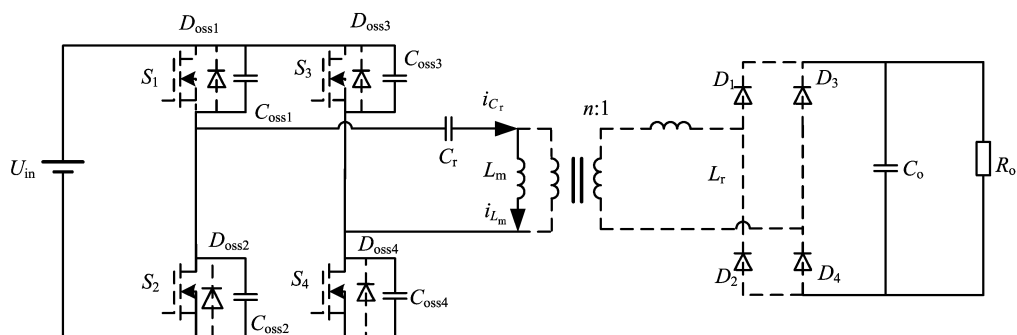
(a) 工作阶段1 $[t_0, t_1]$ (b) 工作阶段2 $[t_1, t_2]$ (c) 工作阶段3 $[t_2, t_3]$ (d) 工作阶段4 $[t_3, t_4]$

图4 DC-DC变换器各工作阶段等效电路

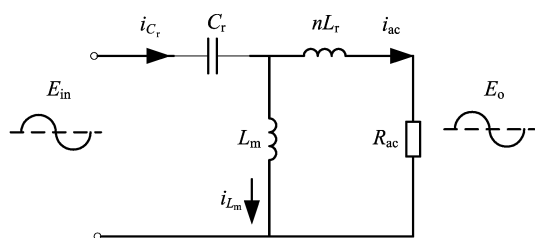


图5 DC-DC 变换器交流等效电路

$$f_{i2} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{nL_r L_m}{L_m + nL_r} C_r}} \quad (3)$$

LLC 谐振变换器两谐振频率比常取 1.5 ~ 3.0 之间的数值,本研究选取 $f_{i1} = 2f_{i2}$, 因而联立公式 (2)、(3) 可得 $L_m = 3nL_r$ 。

谐振网络品质因数 Q 为

$$Q=\frac{\sqrt{\frac{L_m}{C_r}}}{R_{ac}} \tag{4}$$

品质因数 Q 按工程实践一般取值在 0.3 ~ 0.5 之间,本研究取值为 0.4。由此可得谐振网络各元件取值为

$$\begin{cases} C_r=\frac{1}{2\pi Qf_{r1}R_{ac}} \\ L_m=\frac{1}{(2\pi f_{r1})^2C_r} \\ L_r=\frac{1}{3n}L_m \end{cases} \tag{5}$$

输出电压与输入电压之比为电压增益,电压增益是评判变换器能量传输效率的重要指标,在 PSPICE 仿真环境下搭建模型,对比得到传统变换器与本研究所提出的变换器电压增益特性曲线如图 6 所示。

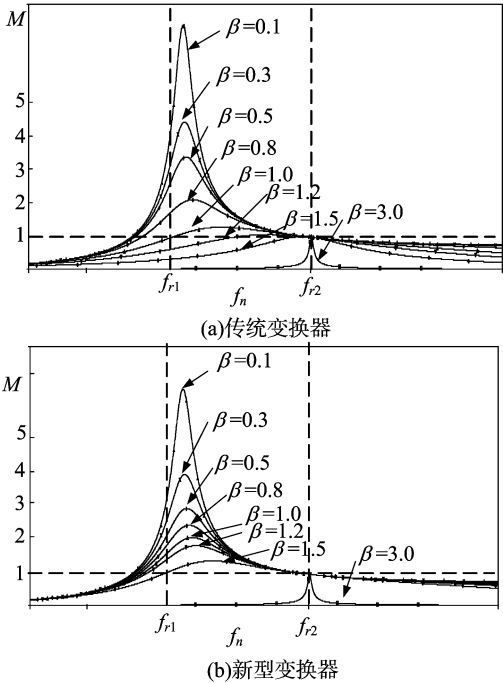


图6 变换器增益特性曲线

图 6 中 M 为电压增益, $M=nU_o/U_{in}$, f_n 为归一化的工作频率, β 为负载率(即实际负载与额定负载之比)。在变换器设计时,应使其工作在两谐振频率范围($f_{r1} \leq f_s \leq f_{r2}$)时,在负载范围内($\beta \leq 1$)电压增益 $M \geq 1$,则变换器有较好的带载能力和能量传输能力。由图 6(a)可知,传统 LLC 谐振变换器能在 $\beta \leq 1$ 的范围内,实现电压增益 $M > 1$,而超出额定负载范围时,变换器无法实现能量的高效传输。由图 6(b)可知,本研究所提出的变换器结构,能够使变换器在负载率 $\beta = 1.5$ 的重载情况下依然实现 $M > 1$,证明本研究所提出的变换器更能适应农业纳网负载变化情况复杂、波动较大等特点。

3 试验分析

为了验证本研究所提出的新型农业纳网 DC-DC 变换器的有效性,特设计了一台输入电压 65 ~ 70 V、输出电压 250 V、电流 20 A、5 kW 功率等级的 DC-DC 变换器,其设计参数如表 1 所示,样机如图 7 所示。

表 1 变换器主要参数

项目	参数
L_r	448 μ H
L_m	336 μ H
C_r	84 nF
n	8 : 32
f_{r1}	30 kHz
f_{r2}	60 kHz

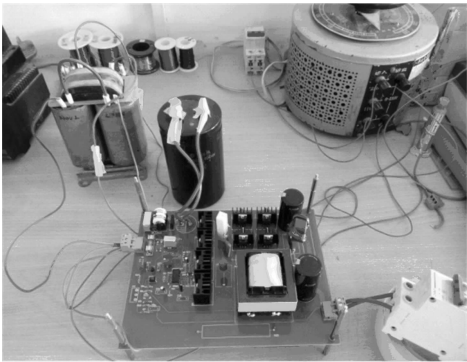


图7 变换器试验样机

在不同负载率条件下对变换器进行测试,以左上桥臂为例,可得变换器主要波形 u_{Gsl} 、 u_{Gss1} 与 i_c ,如图 8 所示。对比图 8 与图 3 可知,在超过变换器额定负载,即负载率 $\beta > 1$ 时,变换器主要波形仍与理想波形保持一致,因而证明本研究所提出的变换器可在较宽的负载范围内正常工作,能够适应农业纳网负载多变、私接负载过负荷等方面的特点。

通过功率分析仪测得不同负载率下变换器样机效率如图 9 所示,可知本研究所研制的试验样机能够在较大负载范围内保持较高能量传输效率,从而提高了农业纳网用电效率。

4 结论

农村电网具有负载种类复杂多变、使用无规律等特点,因而使其对电网要求较高。农村电网作为电力系统组成部分,与大电网具有较强的动态紧密性,当大电网出现波动或故障时,农村电网也会受到较大影响。针对此问题,本研究提出了农业纳网的概念,将发电、储能、控制系统及负载结合成整体,看作大电网的一个负载,使其可以与大电网并网运行,也可以在大电网出现故障时主动与电网断开孤网运行,从而保证对农村用户的持续可靠供电。

单向 DC-DC 变换器是向纳网注入能量,给负载提供电能的重要枢纽,本研究提出了一种新型 LLC 谐振式 DC-DC 变换器,能够在较宽的负载范围内实现能量的高效传输,从而适应农业纳网负载多变、私接负载过负荷等方面的特点,高效可靠地保证农村生产生活用电,最后研制了一台 5 kW 功率等级的 DC-DC 变换器,通过试验验证了本研究所提变换器的有效性。

参考文献:

[1] 刘 鑫. 考虑城镇化发展农网多类负荷的协整分析及预测[D]. 长沙:长沙理工大学,2014.
[2] 边静涛. 农村电网电压质量及无功补偿应用研究[D]. 保定:华北电力大学,2013.

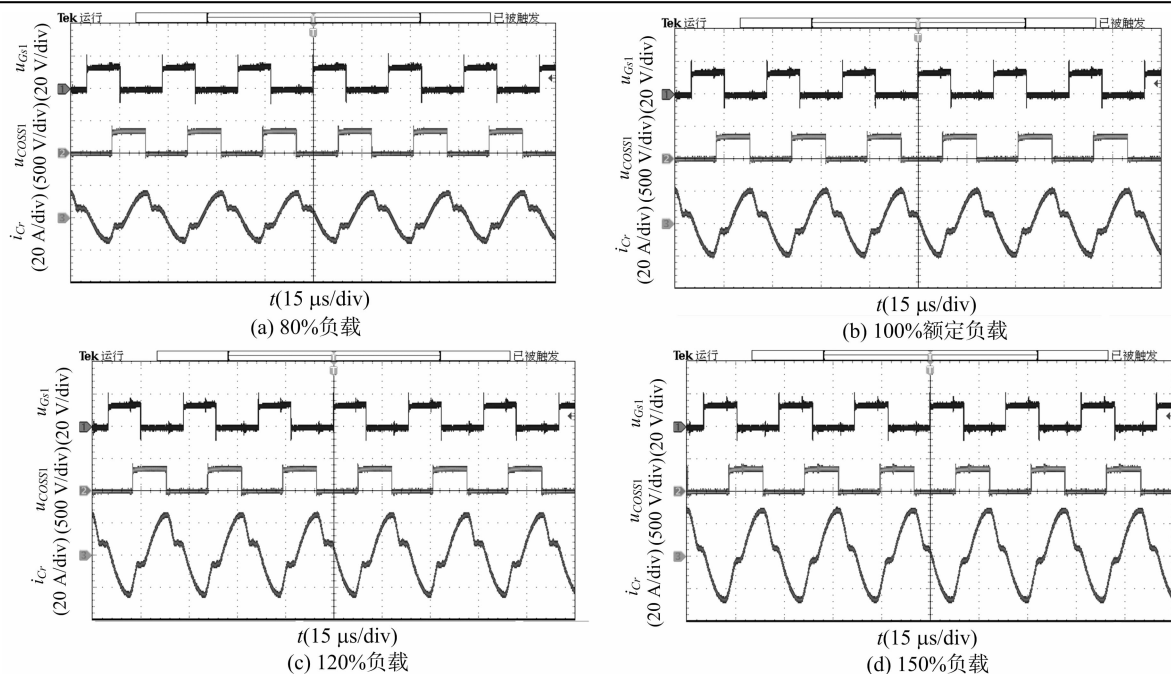


图8 变换器主要试验波形

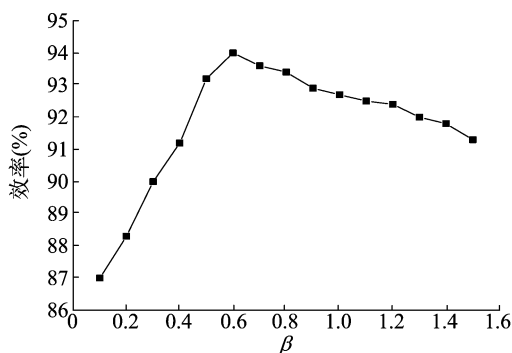


图9 变换器效率曲线

- [3] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-107.
- [4] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
- [5] Lasseter R H. Smart distribution; coupled microgrids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1074-1082.
- [6] Alex H, Mariesa L C, Gerald T H, et al. The future renewable electric energy delivery and management system; the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [7] Bryan J, Duke R, Round S. Decentralized generator scheduling in a nano grid using DC bus signaling[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2004 IEEE power Engineering Society General Meeting. Piscataway: IEEE Power and Energy

Society, 2004(1): 977-982.

- [8] Bryan J, Duke R, Round S. Decentralized control of a nano grid [C]//Australasian Universities Power Engineering Conference. Christchurch, 2003.
- [9] 曹乘栋. 浅谈国内外太阳能发电技术发展状况及展望[J]. 通信电源技术, 2011, 28(1): 35-37.
- [10] 肖朝霞, 刘东, 赵倩宇. 多功能光伏发电系统仿真设计[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(4): 12-16.
- [11] Hayashi Y. Power density design of SiC and GaN DC-DC converters for 380V DC distribution system based on series-parallel circuit topology[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Long Beach: IEEE, 2013: 1601-1606.
- [12] Beiranvand R, Rashidian B, Zolghadri, M. R. Optimizing the normalized dead-time and maximum switching frequency of a wide-adjustable-range LLC resonant converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 462-472.
- [13] Jung J H, Kim H S, Ryu M H, et al. Design methodology of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(4): 1741-1755.
- [14] 辛玉宝, 辛玉才, 张方华, 等. 基于全桥 LLC 谐振的双向直流变压器[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4): 3-5.
- [15] Yang B, Lee F C, Concannon M, et al. Over current protection methods for LLC resonant converter[C]. Proceeding of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003, 2: 605-609.