

一种耦合电感型准开关 Boost 变换器

房绪鹏, 王晓丽, 林强, 王松

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:将耦合电感和开关电容结构同时应用到准开关 Boost 变换器中,提出了一种新型的耦合电感型准开关 Boost 变换器。在开关占空比一定的范围内,该电路可以通过改变耦合电感匝数比的方式来提高变换器的电压增益能力。由于该拓扑中无源钳位电路结构的存在,耦合电感漏感的能量能够被输出端回收利用,有效降低了开关管电压尖峰,从而提高了变换器的效率。详细介绍了该变换器的工作原理并对稳态性能进行了分析,同时与其它三种相关变换器进行对比。最后,根据仿真结果搭建实验电路,验证了所提出变换器理论分析的正确性和可行性。

关键词:变换器;高增益;耦合电感;电压应力

中图分类号:TM463 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd21604

A Quasi-switched Boost Converter with Coupled-inductor

FANG Xupeng, WANG Xiaoli, LIN Qiang, WANG Song

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: Applying the coupled inductor and switched capacitor structures to the quasi-switched Boost converter at the same time, a new type of coupled inductor quasi-switched Boost converter was proposed. Within a certain range of duty cycle, the circuit could improve the voltage gain capability of the converter by changing the turns ratio of the coupled inductor. Due to the existence of passive clamping circuit structure in this topology, the energy of the coupled inductor leakage inductance could be recycled at the output end, which could effectively reduce the voltage spike of the power switch, and improve the efficiency of the converter. The working principle of the converter was introduced in detail, and the steady-state performance was analyzed, and the converter was compared with other three related converters. Finally, the experimental circuit was constructed based on simulation results, which verifies the correctness and feasibility of the proposed converter theoretical analysis.

Key words: converter; high gain; coupled inductor; voltage stress

近年来,日益突出的能源危机和日益加剧的环境污染,导致世界能源结构发生变化,光伏发电等新兴可再生能源发电引发人们广泛的关注^[1-2]。这些新能源发电方式,具有低碳、环保、储量巨大等优点^[3],因此已成为近年来国内外研究的热点。然而,由于光伏等新能源的实际输出电压相比于并网逆变器的输入电压要低很多,因此,在光伏发电系统中为了实现电压的提升,需要在输入端和负载之间加入一个直流升压环节以满足光伏电池的输出电压等级要求^[4-5]。

传统 Boost 变换器由于其控制简单、工作原理明晰,成为使用最广泛的升压变换器之一。然而想要获得较高的电压增益,要求电路工作在极限占空比的情况下才能实现,在这种状态下开关管的电压应力也会骤增,从而造成整个电路的器件损耗较大,降低了 Boost 变换器能量利用效率。为了解决这个矛盾,国内外许多研究人员提出了多种改进方法:1)引入开关电容技术^[6-7]可以使电路拓扑的电压增益大幅度增加,缺点是在电容充电的过程中电流尖峰会变大,从而增大了开关

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2016EEP10);山东省研究生教育优质课程建设项目(SDYKC17032);

山东省重点研发计划项目(公益类)(2019GGX103049)

作者简介:房绪鹏(1971—),男,博士,教授,Email:xpfang69@163.com

损耗;2)引入级联式变换器结构^[8],虽然能使变换器获得更高的电压增益,但却增加了元器件的数量,不易于控制且效率较低;3)引入耦合电感技术^[9]在提高变换器电压增益的同时又避免了占空比处在较极端的情况,且成本低、可靠性高。但由于漏感的存在会使该电路的开关管两端出现较大的电压尖峰,而引入无源钳位技术,可以有效地解决耦合电感漏感带来的电压尖峰问题,从而可以提高变换器的效率。现有技术中,准 Z 源网络因其结构简单、升压因子高,在直流变换领域有着广泛的应用^[10],在准 Z 源网络基础上提出的准开关 Boost 网络可以在减小系统体积的同时实现相同的升压功能^[11-12]。文献[13]将开关电感和开关电容技术应用到准开关 Boost 网络中,并提出了多开关单元的拓扑,但导致了系统的复杂性。

本文综合以上多种改进方法的优、缺点,将耦合电感和开关电容结构同时应用到准开关 Boost 网络中,提出了一种新型的有源阻抗变换器。该电路的电压增益可以通过调节耦合电感的匝数比 n 来改变,特别是小匝数比的变换器也可以获得较大的电压增益。该拓扑中电感直接连接到输入电压源,因而该变换器的输入电流是连续的。由于该拓扑中无源钳位电路结构的存在,输出端能够回收耦合电感漏感的能量并加以利用,因而使得开关管的电压尖峰可以被有效地抑制,从而变换器的效率有了显著的提高。

1 所提出变换器的拓扑结构与工作原理

1.1 所提出变换器的拓扑结构

图 1 为准开关升压变换器拓扑结构图。

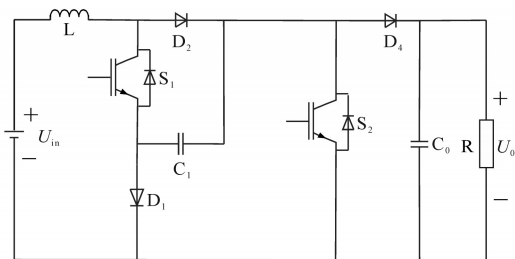
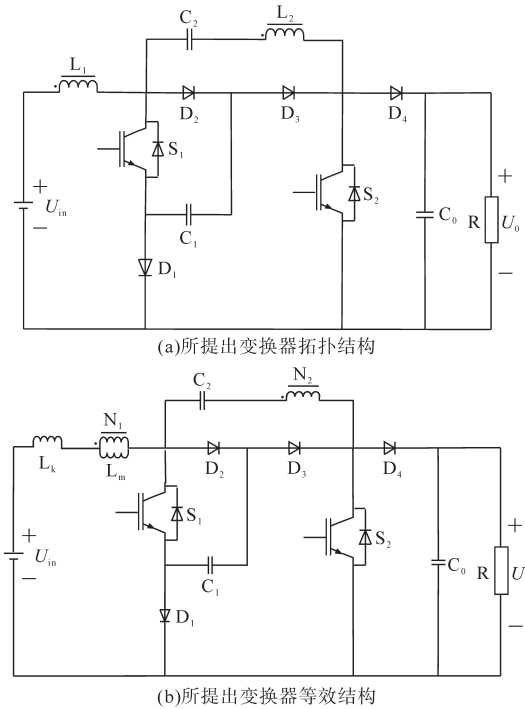


图 1 准开关升压变换器拓扑

Fig.1 Topology of the quasi-switched Boost converter

本文提出的新型耦合电感型准开关 Boost 变换器拓扑如图 2a 所示,与图 1 中的准开关 Boost 变换器相比较,所提出的新型耦合电感型准开关

Boost 变换器在其基础上增加了一个由电容 C_2 和二极管 D_3 组合的开关电容结构,并将输入侧的电感用耦合电感替代。为便于分析,耦合电感可以看作是磁化电感、漏感,以及匝数比为 $N_1:N_2$ 的理想变压器的组合,图 2b 为其等效电路。其中: N_1 为理想变压器原边匝数, N_2 为理想变压器的副边匝数, L_m 为变压器的励磁电感, L_k 为变压器的漏感。



(a)所提出变换器拓扑结构

(b)所提出变换器等效结构

图 2 所提出变换器拓扑及其等效结构

Fig.2 Topology and its equivalent structure of the proposed converter

为了便于对所提出的变换器进行电路分析,首先假设:

- 1) 所有元器件均看作理想器件,忽略开关管和二极管寄生电容的影响,二极管导通和关断时间均为零且忽略导通压降。
- 2) 电容器的电容量足够大且在一个开关周期内其两端的电压保持不变。

1.2 所提出变换器的工作原理

假设电路在 CCM 模式下工作,开关 S_1, S_2 采用同步状态即同时开通关断,在一个开关周期内该变换器有两种开关模式,其两种模式等效电路图分别如图 3a、图 3b 所示。

模态 I [t_0-t_1]: t_0 时刻,开关 S_1, S_2 导通。此时直流电压源 U_{in} 与电容 C_1 串联,为漏感 L_k 和磁化电感 L_m 充电,此时两者电流 i_{Lk}, i_{Lm} 线性增加,电容 C_1 的电压 U_{C1} 减小。副边绕组 N_2 通过二极管 D_3 给电容 C_2 充电,将开关管 S_1 两端的电压进行钳位, U_{C2}

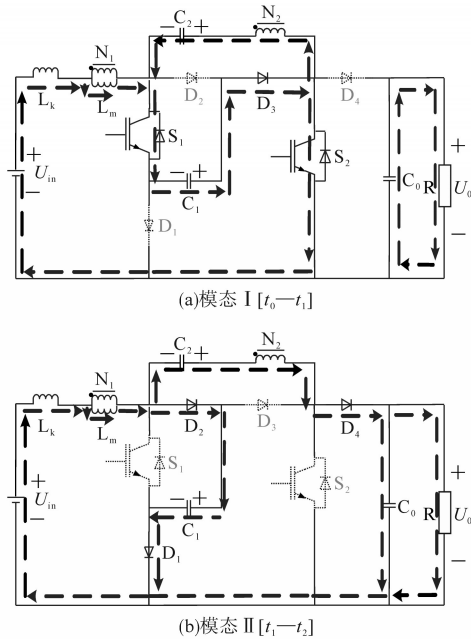


图3 所提出变换器在不同工作模式下的等效电路
Fig.3 Equivalent circuits of the proposed converter in different operation modes

随之增加。二极管 D_2 被 U_{C_1} 所截止, 二极管 D_4 阳极接 U_{in} 负极, 承受反向电压截止, 电容 C_0 向负载 R 供电。当开关 S_1, S_2 关断时, 此模式结束。

模式 II $[t_1-t_2]$: 当 $t=t_1$ 时刻, 开关 S_1, S_2 关断。直流电压源 U_{in} 与原边绕组 N_1 串联连接, 一方面给电容 C_1 充电, 此时电流 i_{Lm}, i_{Lk} 线性减小; 另一方面直流电压源 U_{in} 与原边绕组 N_1 、电容 C_2 、副边绕组 N_2 串联连接, 提供给电容 C_0 和负载高的输出电压。该模式在 t_2 时刻结束, 从而进入下一周期。

为简化分析, 忽略耦合电感初、次级漏感的影响, 在模式 I $[t_0-t_1]$ 中, 绕组 N_1 和 N_2 的电压关系表达式为

$$U_{N_1} = U_{in} + U_{C_1} \quad (1)$$

$$U_{N_2} = \frac{N_2}{N_1} U_{N_1} = U_{C_2} - U_{C_1} \quad (2)$$

在模式 II $[t_1-t_2]$ 中, 绕组 N_1 和 N_2 的电压关系表达式如下:

$$U_{N_1} = U_{C_1} - U_{in} \quad (3)$$

$$U_{N_2} = \frac{N_2}{N_1} U_{N_1} = U_{C_0} - U_{in} - U_{N_1} - U_{C_2} \quad (4)$$

2 所提出变换器的稳态分析

2.1 电压增益的计算

开关 S_1, S_2 在一个开关周期 T_s 内导通的时间

为 DT_s (D 为导通占空比), 则开关管 S_1, S_2 关断的时间为 $(1-D)T_s$ 。由电感伏秒平衡原理及式(1)、式(3)可知:

$$(U_{in} + U_{C_1})DT_s + (U_{C_1} - U_{in})(1-D)T_s = 0 \quad (5)$$

根据式(1)~式(4)电容 C_1, C_2 两端的电压可表示为

$$U_{C_1} = \frac{1}{1-2D} U_{in} \quad (6)$$

$$U_{C_2} = \frac{2 \frac{N_2}{N_1} (1-D) + 1}{1-2D} U_{in} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)中可得:

$$U_{C_0} = \frac{2 \frac{N_2}{N_1} + 2}{1-2D} U_{in} \quad (8)$$

电压增益 B 为

$$B = \frac{U_{C_0}}{U_{in}} = \frac{U_0}{U_{in}} = \frac{2n+2}{1-2D} \quad (9)$$

其中

$$n = N_2 : N_1$$

式中: U_0 为输出电压; n 为耦合电感匝数比。

由式(9)可以看出, 当占空比的调节范围为 $0 \sim 0.5$ 时, 所提出变换器的升压因子大于 1, 从而达到了升压的目的。

图 4 为所提出的变换器在匝数比 n 不同的情况下占空比与电压增益关系的曲线图。通过对比图 4 中各条曲线可以看出, 在占空比相等的情况下, 该变换器能够通过合理调节匝数比 n 来获得更高的电压增益。

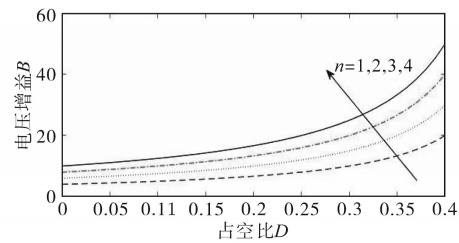


图4 匝数比 n 不同的情况下占空比与电压增益的关系
Fig.4 Relationship between duty cycle and voltage gain with different turns ration

2.2 电压应力的计算

根据图 3 模式电路原理图, 可推导出开关管 S_1, S_2 及二极管 $D_1 \sim D_4$ 的电压应力分别为

$$U_{S_1 - stress} = U_{C_1} = \frac{1}{1-2D} U_{in} = \frac{1}{2n+1} U_0 \quad (10)$$

$$U_{S_2 - stress} = U_{C_0} = \frac{2n+2}{1-2D} U_{in} = U_0 \quad (11)$$

$$U_{D_1} = U_{D_2} = \frac{1}{1-2D} U_{in} \quad (12)$$

$$U_{D_3} = \frac{2n+1}{1-2D} U_{in} \quad (13)$$

$$U_{D_4} = \frac{2n+2}{1-2D} U_{in} \quad (14)$$

3 所提出变换器的对比分析

为了更好地验证所提出的变换器的优点,将该变换器和其他几种相关变换器进行比较,如文献[14]中的 Boost 级联式升压变换器 (boost cascade converter, BC-C)、文献[15]中的交错耦合电感变换器(staggered coupling induct converter, SCI-C)、文献[16]中的含有源开关电感和无源开关电容网络变换器 (active switched-inductor and passive switched-capacitor converter, ASI/PSC-C), 结果如表 1 所示。表 1 中概述了电路中一些重要参数,如元器件数量、开关管电压应力、以及电压增益。

表 1 所提出变换器与其他变换器的对比

变换器	开关数量	二极管数量	开关管电压应力	电压增益
BC-C	2	4	$\frac{1+D}{(1-D)^3} U_0, U_0$	$\frac{1+D}{(1-D)^2}$
SCI-C	2	5	$\frac{1}{2(n+1)} U_0$	$\frac{3n+2}{1-D}$
ASI/PSC-C	2	2	$\frac{1}{1+3D} U_0$	$\frac{1+3D}{1-D}$
所提出变换器	2	4	$\frac{1}{2n+2} U_0, U_0$	$\frac{2n+2}{1-2D}$

3.1 元器件数量

由表 1 可知,与 SCI-C 相比,所提变换器中主要元件数目减少了,进而简化了控制策略,并且该变换器通过引入耦合电感使得升压效果更加明显。ASI/PSC-C 是通过同时引入开关电感、电容结构,增加了该电路的电压增益,本文所提出的变换器虽然比它多了 2 个二极管器件,但却比 ASI/PSC-C 升压能力更高。

3.2 升压能力

所提变换器电路最大的优点就是其升压能力。电压增益比较如图 5 所示。

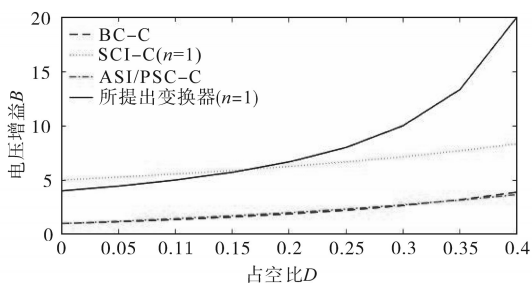


图 5 电压增益比较

Fig.5 Comparison of voltage gain

从图 5 中可以看出,当占空比 D 的范围在 0~0.155 时,所提出变换器电压增益仅略低于 SCI-C,而当 D 在 0.155~0.5 时,该电路的升压能力远大于相同占空比的其他三个电路,且在此范围内,所提出变换器的电压增益随着占空比的增大,其升压效果越好。因此,所提出的变换器仅需较短时间就能输出较高的电压增益,有利于提高全控型器件的转换效率。

3.3 开关管电压应力

开关管电压应力在开关器件选型时起着重要作用。图 6 为四种变换器的开关管电压应力对比曲线图,从图 6 中可知,所提出变换器的开关管电压应力在其他几种变换器中相对较低,因此,在器件选型时可以选用低导通电阻器件,从而提升了变换器的工作效率,进一步提高了系统的可靠性。

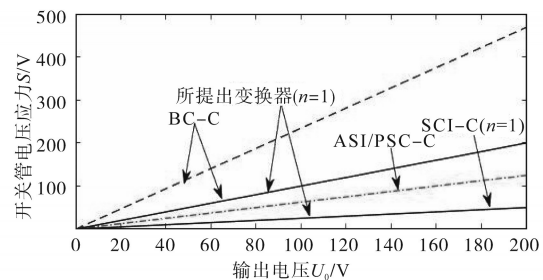


图 6 开关管电压应力比较

Fig.6 Comparison of switch voltage stress

4 仿真与实验验证

为验证上述理论分析的合理性,根据图 2a 利用 Matlab/Simulink 构建了仿真模型,在仿真电路基础上,搭建了实验电路。

电路中的主要参数如下:输入电压 $U_{in}=24\text{ V}$; 电容器 $C_1=470\text{ }\mu\text{F}$; 电容器 $C_2=470\text{ }\mu\text{F}$; 滤波电容 $C_0=820\text{ }\mu\text{F}$; 励磁电感及漏感分别为 $100\text{ }\mu\text{H}$, $2\text{ }\mu\text{H}$; 功率电阻 $R=100\text{ }\Omega$; 匝数比为 1:1; 导通占空比 $D=0.2$; 开关频率 $f_s=50\text{ kHz}$; 二极管 $D_1\sim D_4$ 的型号为 SR5100; 开关管的型号为 H25R1202; 核心控制器为 DSPTMS28335。仿真结果如图 7 所示,利用 MSO-X 3034A 示波器记录的实验主要波形如图 8 所示。

由图 8 可知,电容器 C_1 的电压 U_{C_1} 约为 40 V, 电容器 C_2 的电压 U_{C_2} 约为 100 V, 输出电压 U_o 约为 150 V。考虑到实验所用器件自身损耗,在误差允许范围内,实验结果数值与理论计算结果大致相同,验证了此变换器的可行性。

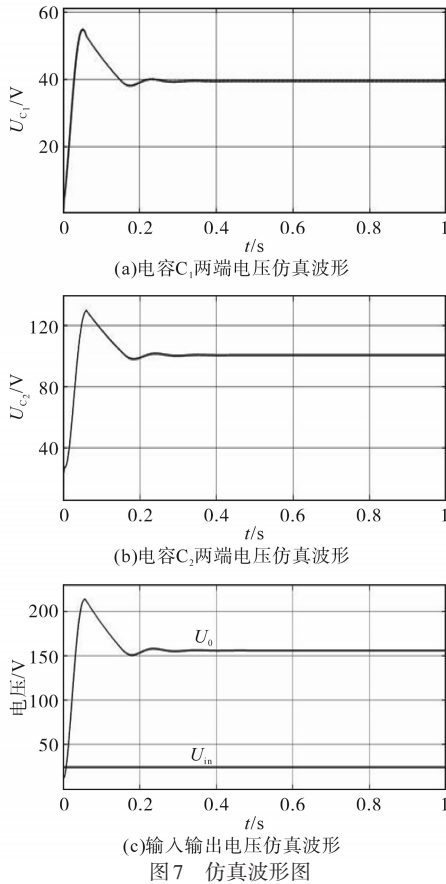


Fig.7 Simulation waveforms

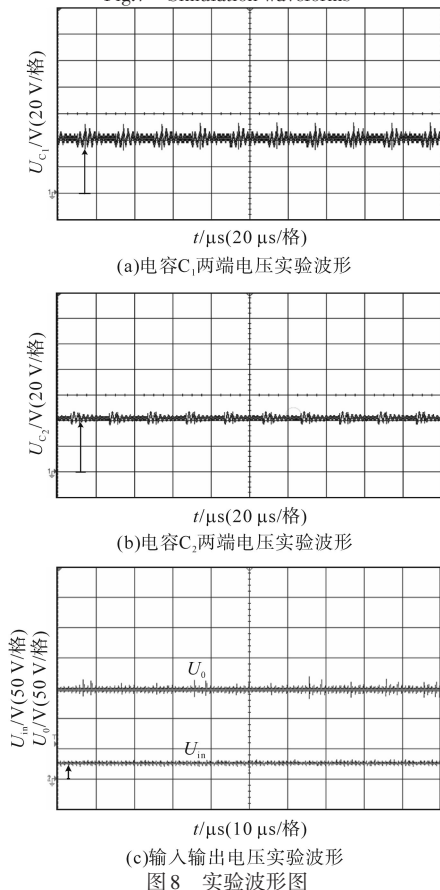


Fig.8 Experimental waveforms

5 结论

本文提出了一种电压增益较高、能应用于新能源发电的 Boost 变换器拓扑电路,详细介绍了该变换器的工作原理并对其稳态性能进行了分析,同时与其它相似变换器进行了对比。最后,在实验室搭建实验样机验证了所提出变换器理论分析的正确性。结果表明,该变换器具有输入电流稳定连续、升压性能优良等特点。此外,该电路在占空比允许的范围内能够通过合理改变匝数比来提高电压增益,因此,该变换器可广泛应用于新能源发电领域。

参考文献

- [1] Calise Francesco, Cappiello Francesco Liberato, Vanoli Raffaele, *et al.* Economic assessment of renewable energy systems integrating photovoltaic panels, seawater desalination and water storage[J]. *Applied Energy*, 2019, 253 (NOV. 1) : 113575.1—113575.17.
- [2] 冷明全,程为彬,刘峰,等.光伏发电系统前级宽输入 DC/DC Boost 变换器[J]. *电气传动*, 2020, 50(3) : 37-39.
- [3] 赵扬.基于准 Z 源 DC-DC 变换器的拓扑研究[D].青岛:山东科技大学,2018.
- [4] Hu X, Gong C. A high voltage gain DC-DC converter integrating coupled-inductor and diode-capacitor techniques[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2014, 29(2) : 789-800.
- [5] Wu Bin, Li Shouxiang, Liu Yao, *et al.* A new hybrid Boosting converter for renewable energy applications[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016, 31(2) : 1203-1215.
- [6] 马智文,曾怡达,杨辉金.一种新型开关电感、开关电容的高增益 Boost 变换器[J]. *电源学报*, 2018, 16(2) : 119-123, 177.
- [7] 杨磊.开关电容变换器及其控制技术研究[D].西安:西北工业大学,2017.
- [8] Saravanan S, Babu N R. Analysis and implementation of high step-up DC-DC converter for PV based grid application[J]. *Applied Energy*, 2017, 190: 64-72.
- [9] Wu H, Lu J. Nonisolated bidirectional DC-DC converters with negative-coupled inductor[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2012, 27(5) : 2231-2235.
- [10] 金林,张波.一种开关电感型准开关升压变换器[J]. *电源学报*, 2019, 17(2) : 63-71.
- [11] Mishra S, Adda R, Joshi A. Inverse watkins-johnson topology-based inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(3) : 1066-1070.
- [12] Nguyen M, Le T, Park S, *et al.* A class of quasi-switched Boost inverters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(3) : 1526-1536.
- [13] Zhu X, Zhang B, Li Z, *et al.* Extended switched-boost DC-DC

(下转第 56 页)

本设计为其他行业实现远程监控也打下了坚实的基础。

参考文献

[1] 张修建,靳硕,赵茜,等.基于Web的工业污水处理远程监控系统[J].系统仿真学报,2012,24(5):1104-1108.

[2] 徐侃,丁强.一种基于MQTT协议的物联网通信网关[J].仪表技术,2019(1):1-4,43.

[3] 周鹏,徐金城,杨博.工业物联网中基于边缘计算的跨域计算资源分配与任务卸载[J].物联网学报,2020,4(2):96-104.

[4] 汪理.基于PLC的污水处理系统设计与组态仿真[J].机电信息,2019(21):21,23.

[5] 陈洪科.基于PLC的MBR污水处理控制系统设计[J].机电技术,2019(4):30-32,55.

[6] 于海飞,张爱军.基于MQTT的多协议物联网网关设计与实现[J].国外电子测量技术,2019,38(11):45-51.

[7] 连静.基于S7-300 PLC的污水处理自动控制系统[D].西安:

西安石油大学,2019.

[8] 于振中,洪辉武,徐国,等.基于MQTT的数据加密传输算法[J].计算机系统应用,2019,28(10):178-182.

[9] 吴俊辉,吴桂初,陈冲,等.基于MQTT协议的物联网网关设计[J].温州大学学报(自然科学版),2019,40(4):54-61.

[10] 熊梦彪,高誉,周龙丽,等.基于NodeMeu和MQTT协议的物联网网关设计[J].数字通信世界,2019(12):47.

[11] 汪松松,彭来湖,戴宁,等.基于工业互联网的针织机械互联互通结构研究[J].纺织学报,2020,41(1):165-173.

[12] Andrés Villa-Henriksen, Gareth T C Edwards, Liisa A Pesonen. Internet of things in arable farming: implementation, applications, challenges and potential[J]. Biosystems Engineering, 2020, 191: 60-84.

[13] Mobasshir Mahbub. A smart farming concept based on smart embedded electronics, internet of things and wireless sensor network[J]. Internet of Things, 2020, 9: 50-65.

收稿日期:2020-03-03

修改稿日期:2020-04-20

(上接第20页)

converters adopting switched-capacitor/switched-inductor cells for high step-up conversion[J].IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3): 1020-1030.

[14] 段宛宜,王辉.一种Boost级联式高增益DC/DC变换器[J].电器与能效管理技术,2020(2):54-60.

[15] 陈浩,胡雪峰,王建章.一种高增益交错耦合电感DC/DC变换器[J].电源学报,2019,17(6):41-49.

[16] Salvador M A, Lazzarin T B, Coelho R F. High step-up DC-DC converter with active switched-inductor and passive switched-capacitor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5644-5654.

收稿日期:2020-03-10

修改稿日期:2020-05-07