**“谐振型开关电感准Z源光伏并网发电**

**系统关键技术的研究”**

**项 目 工 作 总 结**

1. **项目概要**

**1、项目简介**

能源是经济和社会发展的重要物质基础，工业革命以来，世界能源消费激增，煤炭、石油、天然气等化石能源资源消耗迅速，生态环境不断恶化，特别是温室气体排放导致日益严峻的全球气候变暖，人类社会的可持续发展受到严重威胁。随着传统化石能源的日益枯竭，全球将再一次面临能源危机。

可再生能源开发利用日益受到国际社会的重视，许多国家提出了明确的发展目标，制定了支持可再生能源发展的法规和政策。太阳能因资源丰富、分布广泛、清洁无污染、安全可靠等优点成为替代传统化石能源最理想的新型能源。在太阳能的诸多利用形式中，光伏发电系统是直接将太阳能转化为电能，在应用性和可存储性等方面更加便于人类使用，成为当前和未来太阳能 主要利用形式。

逆变器作为光伏发电系统的核心功率调节器件，占据系统成本的比例在10%-15%，具有较高的技术含量，因此并网逆变器是国内外研究和开发的重点，其技术指标代表了逆变器技术水平的高低。目前国内外光伏系统大多采用电压型PWM逆变器，其结构为两级拓扑，控制结构相对复杂、效率低，拓扑之间协调和配合困难，控制算法也较为繁琐，系统的稳定性较差；电压型逆变器一般只能工作于BOOST工况，难以实现直流侧电压的灵活控制。

准Z源逆变器是在传统的Z源逆变器的基础上进行改进的一种拓扑电路，改进的原则是不改变其升压原理，即都是通过桥臂的直通来实现升压功能，所以准Z源逆变器继承了传统Z源逆变器的所有优点。此外，准Z源逆变器与传统Z源逆变器相比还具有独特的优点，比如电容电压不存在启动冲击，稳态运行时在相同的直通占空比的情况下，电容电压应力更小，以及直流电源输出电流连续等优点。此外串联型准Z源逆变器的控制策略和传统Z源逆变器完全相同，所以并不会增加控制成本。准Z源逆变器的优点使其更适合应用于大功率的光伏等新能源并网逆变系统中。

谐振软开关技术可以减小甚至完全消除逆变电路中开关管在开关过程中的开关损耗，去掉了缓冲吸收电路，提高了开关器件的开关频率，减小散热器件的体积及电磁干扰，提高逆变电路的变换效率与可靠性。因此，开关变换器的软开关高频化是电力电子技术的重要研究方向之一，也是实现开关变换器的小型化、高效率、静音化、无污染的重要途径，从美国弗吉尼亚电力电子中心的李泽元教授、美国威斯康星大学的 D.M.Divan 教授到我国浙江大学何湘宁教授和钱照明教授、南京航空航天大学的严仰光教授都围绕最基本的软开关逆变拓扑展开了研究。此外，新型软开关电路结构的出现和应用范围也在不断扩大：Chien-ming Wang提出了新型的功率因数校正器； H.Ogiwara等人设计出一种新型的单端推挽式软开关高频逆变电路在家用加热电器中具有很好的安全性与高效性；C.M.Wang等人提出了新型的零电流 PWM 开关单元，工作频率固定，减少了换相损耗，适用于大功率场合。已经有研究指出，由于直通零状态的加入，在一个开关周期里，Z源/准Z源逆变器比传统的电压源型逆变器需要更多的开关次数，因此相对于传统电压源型逆变器，转换效率较低。将谐振软开关技术与准Z源相结合，将给新能源高效率并网发电带来新的研究思路。

通过对现有的Z源与各种准Z源逆变器及软开关技术进行分析研究的基础上，本报告将详细介绍软开关技术与Z源逆变器的结合，并提出几种新型的具有更多优点的开关电感型准Z源逆变器拓扑，采用相应的控制策略使其更加适合应用于大功率光伏并网发电系统中，针对最大功率跟踪、孤岛检测和并网功能简化系统结构，提高系统的稳定性。

**2、项目来源与批复情况**

2014年东南大学与江阴方程电气自动化研究所有限公司共同申报的“谐振型开关电感准Z源光伏并网发电系统关键技术的研究”项目获准立项，项目编号为BY2014127-13；执行时间为2014.7-2016.6月；总经费112万元，其中省拨款15万元，自筹97万元。

**3、项目主要研究内容**

(1) 谐振型开关开关电感准Z源逆变器参数设计

分析了谐振型开关电感准Z源逆变器单级电路拓扑特性，建立了数学模型，完成了逆变器参数设计，包括电感与电容参数计算。具体研究了三种占空比与电压增益、电感电流比例的关系，确定了逆变器工作模式。

(2) 开关电感型准Z源单级拓扑结构的三环控制结构设计

研究并设计了基于开关电感型准Z源单级拓扑结构的三环控制结构，包括电压环、电流环和功率环的控制协同结构，并根据系统的静动态性能设计了相应的控制器参数。

(3) 逆变器并网离网控制策略

研究了逆变器并网和离网的控制策略，以及并网、离网双模工作方式的控制方法。

(4) 基于谐振型开关电感准Z源逆变器的最大功率跟踪策略

分析了光伏阵列在无阴影以及有阴影条件下的输出差异及影响因素。通过matlab仿真软件搭建了在无阴影及有阴影条件下的光伏阵列仿真模型，通过仿真分析研究了光伏阵列在有阴影及无阴影条件下的输出特性。根据分析出的输出特性改进了MPPT算法，并使之能够适用于各种环境条件。

(5) 基于谐振型开关电感准Z源逆变器的快速孤岛检测算法

分析了孤岛情况下电压不平衡度与有功电流之间的关系，引入了正反馈回路，将电压不平衡度乘正反馈系数叠加于有功电流之上，这样当孤岛出现时，电压不平衡度由于正反馈回路的影响不断变大，直到超出安全阀值。同时，设定了伪孤岛判定时长，当电压不平衡度在这一时长持续高于安全阀值，可判断为孤岛发生，可以有效避免伪孤岛情况下误操作发生。

(6) 开关电感型准Z源逆变器样机设计

根据理论数据和仿真结果设计了开关电感型准Z源逆变器的样机系统的软硬件系统。

**二、项目考核指标与完成情况**

**1主要技术指标**

1. 额定容量：≥50kW
2. 整机效率：≥95％
3. 并网电流THD：≤5％。
4. 最大功率跟踪效率：≥99％
5. 孤岛检测时间低于国家检测标准
6. 《谐振型开关电感准Z源光伏并网发电系统关键技术的研究》专题报告
7. 谐振型开关电感准Z源光伏并网逆变器仿真系统
8. 谐振型开关电感准Z源光伏并网逆变器仿真实验平台

**完成情况：**开发了谐振型开关电感准Z源光伏并网逆变器仿真系统和实验平台，进行了检测实验。完成《谐振型开关电感准Z源光伏并网发电系统关键技术的研究》等专题报告，对逆变器样机进行测试，测试结果表明均达到指标。

**2其它考核指标**

1. 申请专利5项
2. 发表国内外核心期刊收录学术论文4-5篇

**完成情况：**项目执行期间受理发明专利（公开）5件；在国内外学术期刊发表相关学术论文6篇，其中SCI收录1篇，EI收录3篇。

（1）授权与受理的专利

1. 郑建勇、梅军、孙博、邓凯、付广旭，一种准Z源逆变器，国家发明专利，授权公告日：2016-04-06，授权公告号：CN 103701342 B。
2. 郑建勇、梅军、邓凯、孙博、梅飞、付广旭，一种准Z源逆变器，国家发明专利，授权公告日：2015-01-28，授权公告号：CN 103117650 B。
3. 郑建勇、梅军、张宸宇、胡洛瑄、周福举、邓凯，一种基于混合储能 VSI 平抑微网功率波动的控制方法，国家发明专利，授权公告日：2016-06-29，授权公告号：CN 104362656 B。
4. 郑建勇、梅军、胡路苹、胡洛瑄、缪惠宇、张震、胡子杰，一种微网中重要节点电能质量治理方法，国家发明专利，申请日：2015-04-16，申请号：201510182793.8。
5. 郑建勇、梅军、孙博、邓凯、梅飞，基于有功电流-电压不平衡度正反馈的孤岛检测方法，国家发明专利，申请日：2013.05.30，申请号：201310213545.6。
6. 郑建勇、梅军、张宸宇、周福举、胡洛瑄、邓凯，一种平抑间歇性电源功率波动的混合储能控制方法，国家发明专利，申请日：2014-10-24，申请号：201410578187.3。

（2）发表的与项目相关的论文

[1] Zhang, Chenyu; Mei, Jun; Zheng, Jianyong; Deng, Kai; Zhou, Fuju. Control Method for Fault-Tolerant Active Power Filters[J]. Journal of Power Electronics, 2015, 15. (SCI).

[2] Chao, Qian; Mei, Jun; Zhu, Chao; Zheng, Jianyong. A new fast filtering algorithm based on multiple digital sampling rate conversion[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 687-691. (EI).

[3] Deng, Kai; Wang, Jiaming; Zhang, Chenyu; Mei, Jun; Zheng, Jianyong. Control of Grid-connected Quasi-Z Source Inverter Based on Three-states Constant Frequency Hysteresis Current Control. Applied Mechanics and Materials, 2014, 687-691.(EI).

[4]孙博,郑建勇,梅军. 基于电压不平衡度正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35:121-125. (EI).

[5]周福举,张宸宇,郑建勇,胡洛瑄. 基于混合储能电压源逆变器平抑微电网功率波动的方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2014, 21. (核心).

[6梅飞,张宸宇,郑建勇,邓凯,周福举,胡洛瑄. 谐波功率均分的改进分频下垂控制器[J]. 电器与能效管理技术,2015,01.(核心)

**三、项目关键技术与创新点**

**1、谐振型开关开关电感准Z源逆变器的设计**

为了研究谐振型开关电感准Z源拓扑结构，引入了谐振软开关技术，提高了系统的转换效率；对于单级电路拓扑，引入一套控制算法，具有更多的控制自由度，能在不同的工况下工作，避免两级电路及其控制算法之间的协调和配合，提高了系统的可靠性，降低了设备的软硬件成本；电压增压理论上可任意调节，输出电压动态范围宽并且电容电压应力较小，几乎可以应用于所有整流、逆变场合，可取代逆变器拓扑结构，特别适用于大功率风力发电和光伏发电并网场合，具有很高的应用前景。

**2、基于开关电感型准Z源逆变器最大功率跟踪策略研究**

国内外已经针对阴影条件下提出不少MPPT算法，但新算法大都比较复杂，实现比较论难，难以适用于工程项目。本项目根据光伏在有/无阴影条件下的输出特性，探索出既简单又高效准确的新型MPPT算法，使之适用于各种环境条件。

**3、基于开关电感型准Z源逆变器快速孤岛检测算法研究**

传统孤岛检测算法要不有检测盲区，要不就对电能质量产生破坏。本项目通过建立电压不平衡度与有功电流之间正反馈回路，确定了正反馈系数与电压不平衡度安全阀值，同时引入伪孤岛判定时长，即实现了孤岛的快速检测，又不会对电能质量造成破坏，同时避免了伪孤岛情况下的误操作。

**四、项目组织与管理**

为保证项目如期完成，加强项目质量控制与实施能力，项目承担单位东南大学和江阴方程电气自动化研究所有限公司协力合作，从项目实施、队伍组织、条件保障等方面加强管理，成立了15人的研发团队（如表1所示），明确工作分工和责任，制定了研究进度计划。

表1 项目研发团队

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 姓 名 | 性别 | 职称 | 从事专业 | 所在单位 |
| 1 | 郑建勇 | 男 | 正高 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 2 | 梅军 | 男 | 副高 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 3 | 何巍 | 男 | 中级 | 热能与动力 | 江阴方程电气自动化研究所有限公司 |
| 4 | 范满红 | 女 | 副高 | 经济管理 | 江阴方程电气自动化研究所有限公司 |
| 5 | 邓凯 | 男 | 其他 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 6 | 孙博 | 男 | 其他 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 7 | 张宸宇 | 男 | 其他 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 8 | 朱超 | 男 | 其他 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 9 | 王嘉明 | 男 | 其他 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 10 | 周福举 | 男 | 其他 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 11 | 缪惠宇 | 男 | 其他 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 12 | 朱睿 | 男 | 其他 | 电力电子与电力传动 | 东南大学 |
| 13 | 包虎平 | 男 | 中级 | 计算机 | 江阴方程电气自动化研究所有限公司 |
| 14 | 黄洁 | 男 | 中级 | 自动化 | 江阴方程电气自动化研究所有限公司 |
| 15 | 胡秋立 | 男 | 初级 | 自动化 | 江阴方程电气自动化研究所有限公司 |

**五、经费来源与使用情况**

截目项目执行期末，实际到位研发经费115万元，其中省拨专项经费15万元，自筹经费97万元。项目实际支出经费25万元，其中省拨经费13.2万元，自筹经费12万元。

表1．项目实际到位经费情况： 单位：万元

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 项目  总经费 | 其中 | | | |
| 省拨款 | 单位自筹 | 部门、地方配套 | 其他来源 |
| 预算总额  （按合同自动生成） | 112 | 15 | 100 | 0 | 0 |
| 已到位数 | 112 | 15 | 97 | 0 | 0 |

表2：项目经费预算与支出 单位：万元

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 科 目 | 总经费 | | 省拨经费 | | 自筹经费 | |
| 预算数 | 支出数 | 预算数 | 支出数 | 预算数 | 支出数 |
| （一）直接费用 | 90 | 15.32 | 12 | 11.43 | 78 | 3.89 |
| 1、设备费 | 15 | 0.73 | 2 | 0.73 | 13 | 0 |
| （1）设备购置费 | 7 | 0.73 | 1 | 0.73 | 6 | 0 |
| （2）设备试制费 | 7 | 0 | 1 | 0 | 6 | 0 |
| （3）设备改造与租赁费 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2、材料费 | 30 | 1.72 | 4 | 1.72 | 26 | 0 |
| 3、测试化验加工费 | 7 | 0.4 | 1 | 0.4 | 6 | 0 |
| 4、燃料动力费 | 15 | 0 | 2 | 0 | 13 | 0 |
| 5、差旅费 | 15 | 3.18 | 2 | 3.18 | 13 | 0 |
| 6、会议费 | 7 | 0 | 1 | 0 | 6 | 0 |
| 7、国际合作与交流费 | 7 | 0 | 1 | 0 | 6 | 0 |
| 8、出版/文献/信息传播/知识产权事务费 | 7 | 3.18 | 1 | 3.18 | 6 | 0 |
| 9、劳务费 | 0 | 6.11 | 0 | 2.22 | 0 | 3.89 |
| 10、专家咨询费 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11、其他支出 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0 |
| （二）间接费用 | 22 | 9.6 | 3 | 1.8 | 19 | 7.8 |
| 合 计 | 112 | 24.92 | 15 | 13.23 | 97 | 11.69 |

**六、结语**

本项目分析研究了谐振型开关电感准Z源光伏发电并网逆变系统：研究了谐振型开关电感准Z源拓扑；研究了光伏阵列局部阴影条件下输出特性；研究并提出了基于电压不平衡度-有功电流正反馈的新型快速孤岛检测算法；对开关电感型准Z源逆变器的主电路参数进行了理论分析，并根据相应参数设计了样机；研究了并建立了样机控制系统以及相关软硬件设计，包括样机功率部分和控制模块的电路板设计。本项目提出了适用于准Z逆变器的谐振型拓扑及两种改进型开关电感准Z源逆变器的方案；提出了改进型电导增量算法，对于任意规模的光伏阵列在不同阴影条件下皆可适用，大大提高了光伏发电系统的整体效率；有效解决了三相电压不平衡情况下的孤岛检测问题；提供了开关电感准Z源逆变器的参数设计方案，提出了三环并网控制策略，实验显示该样机性能优良，各项指标符合要求，填补了国内空白，达到了国际先进水平。

致 谢

本项目得到江苏省产学研前瞻性研究项目“谐振型开关电感准Z源光伏并网发电系统关键技术的研究”（项目编号BY2014127-13）的资助。