

DC/DC 隔离型制氢电源发展现状与趋势

孔令国¹, 官健¹, 杨士慧², 倪德富³, 王士博¹, 刘闯¹

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省吉林市 132012; 2. 先进输电技术国家重点实验室(国网智能电网研究院有限公司), 北京市昌平区 102209; 3. 国网江西鹰潭供电公司, 江西省鹰潭市 335000)

Development Status and Trend of DC/DC Isolated Hydrogen Production Power Supply

KONG Lingguo¹, GONG Jian¹, YANG Shihui², NI Defu³, WANG Shibo¹, LIU Chuang¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology (Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.), Changping District, Beijing 102209, China; 3. Yingtan Power Supply Branch of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Yingtan 335000, Jiangxi Province, China)

摘要: 随着国家“双碳”目标的推进, 电解水制氢将迎来爆发式增长, 其中电源的拓扑及控制对提升制氢系统效率具有重要意义。对DC/DC隔离型制氢电源的拓扑进行梳理及分析, 针对不同的应用场景, 分别从单级型、两级型、并联型和多端口型DC/DC隔离型制氢电源的结构及其优缺点进行分析, 结果表明, 全桥谐振变换器及考虑电解槽温度、压力及氢/氧交叉渗透反馈的控制方案, 将成为适应宽范围、强波动的大功率规模化制氢电源发展趋势, 且隔离型三端口DC/DC变换电源将成为分布式集成化电-氢耦合未来发展模式, 为电解水制氢电源进一步研究提供参考。

关键词: 氢能; 制氢电源; 拓扑结构; 电解水制氢; 隔离型DC/DC变换器

ABSTRACT: With the advancement of the national goal of “double carbon”, the hydrogen production by electrolytic water will usher in explosive growth, among which the topology and control of power supply is of great significance to improve the efficiency of hydrogen production system. This paper took the topology of isolated DC/DC hydrogen production power supply as the main line to sort out and analyze, and summarized and analyzed the structures, advantages and disadvantages of single-stage, two-stage, parallel and multi-port DC/DC isolated hydrogen production power supply according to different application scenarios.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51907021)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51907021).

The analysis shows that the full-bridge resonant converter and the control scheme considering the temperature, pressure and hydrogen/oxygen cross-osmosis feedback of the electrolytic cell will become the development trend of high-power large-scale hydrogen production power supply which can adapt to wide range and strong fluctuation. Moreover, the isolated three-port DC/DC conversion power supply will become the distributed integrated electric-hydrogen coupling development mode in the future. The research of this paper aims to provide theoretical reference for the further research of hydrogen production by electrolytic water.

KEY WORDS: hydrogen energy; hydrogen preparation power supply; topological structure; hydrogen production by electrolytic water; isolated DC/DC converter

0 引言

在全球能源转型和“双碳”目标的背景下, 氢能成为了我国未来能源战略中不可替代的重要角色之一^[1]。2021年, 国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要草案中明确提出要在氢能与储能等前沿科技和产业变革领域谋划布局一批未来产业^[2-5]。2022年3月, 国家发改委、国家能源局联合印发了《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》, 正式确立了发展氢能产业在中国的战略地位^[6-7]。氢能作为一种新型可再生能源, 具有储量丰富、能量密度高、清洁高效等优点^[8-10]。目

前, 全球大多数氢气的生产来源于化石燃料^[11], 特别是由天然气重整所产生的灰氢, 占据了较大的市场份额。为了减少化石燃料的消耗以及二氧化碳等温室气体的排放, 电解水制氢(绿氢)被认为是一种有前途的替代方案^[12-18]。其中制氢电源是电解水制氢中的核心装置, 不同的制氢电源对电解产生氢气的纯度、效率以及电解槽使用寿命均存在不同的影响^[19-20]。因此, 研究与开发高效的制氢电源对氢能的发展具有重要意义。

制氢电源按照电能的来源不同分为2类, 对于电能来自光伏电源等提供的直流电, 需要经过DC/DC变换器为电解槽供电^[21-22], 而对于电网或风力发电机等提供的交流电, 需要经过AC/DC变换器将交流电转换为直流电为电解槽供电^[23-24]。其中DC/DC变换器按照结构可以分为非隔离型和隔离型。目前, 非隔离型DC/DC变换器多以Buck电路为基础结构, 但是由于Buck电路本身结构特点, 导致大多数非隔离型变换器存在电流纹波大等问题, 仅适用于电压比变化小且无需电气隔离的制氢场合。相对于非隔离型DC/DC变换器, 隔离型DC/DC变换器由于引入高频变压器, 既可以实现降低二次侧电压, 又可以起到一、二次侧电气隔离的作用。为了满足电解槽的需求, 制氢电源应该具备输出电流纹波低、大电流承载能力、高降压比和输出宽电压范围等特性, 同时, 在保证制氢电源可靠性和高效率的情况下尽可能地降低电源成本^[25]。

本文主要对应用于电解水制氢的DC/DC隔离型变换器的拓扑结构及优缺点进行分析总结, 从规模化和集成化的角度提出DC/DC隔离型制氢电源未来发展的技术方案, 并对应用于可再生能源系统(renewable energy systems, RES)和氢储能系统(hydrogen energy storage system, HESS)互联的隔离型DC/DC三端口变换器的典型拓扑结构以及工作模式进行简单介绍, 以期对隔离型DC/DC制氢电源的研究提供参考。

1 DC/DC 隔离型制氢电源

按照制氢电源拓扑结构的不同, 可以将DC/DC隔离型制氢电源分为单级型、两级型、并联型

和多端口型, 以下将分别介绍各类型制氢电源的拓扑结构及其优缺点。

1.1 单级型

1.1.1 半桥DC/DC变换器-RES耦合电解槽

适用于RES与电解槽互联的半桥DC/DC变换器拓扑^[26]如图1所示。该变换器具有开关损耗低、电压调节范围宽等优点, 在RES的宽输入电压范围下, 将进一步提高电解槽制氢效率。但是由于存在能量循环, 导致变换器的功率因数和效率有所降低, 并且它容错能力较差, 当其中一个开关管损坏, 整个变换器均无法工作。

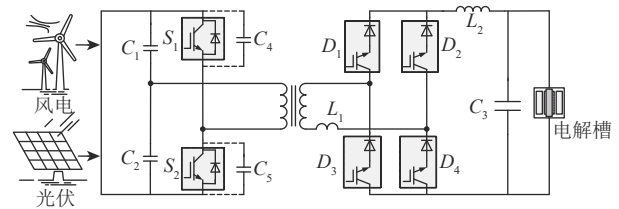


图1 半桥DC/DC变换器

Fig. 1 Half-bridge DC/DC converter

1.1.2 半桥谐振DC/DC变换器-PEM电解槽

适用于质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解槽的半桥谐振变换器拓扑^[27]如图2所示。该变换器具有全范围软开关、高降压比以及通过谐振实现零电压条件最大程度降低开关管应力等优点, 其中高降压比能够很好地满足PEM电解槽低电压的需求, 但是由于半桥拓扑结构容错能力有限, 导致变换器可靠性低且隔离变压器电流应力较大, 因此仅适用于小功率制氢场合。

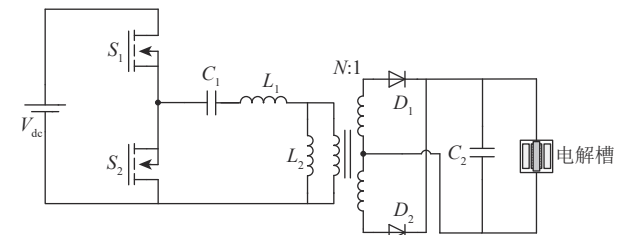


图2 半桥谐振DC/DC变换器

Fig. 2 Half-bridge resonant DC/DC converter

1.1.3 全桥DC/DC变换器-光伏耦合电解槽

适用于光伏制氢系统的全桥DC/DC变换器拓扑^[28]如图3所示。该变换器可以实现零电压开通, 具有输出电流纹波小、输出电压稳定等优点, 能够在光伏制氢系统中提供稳定的输出电压和较高

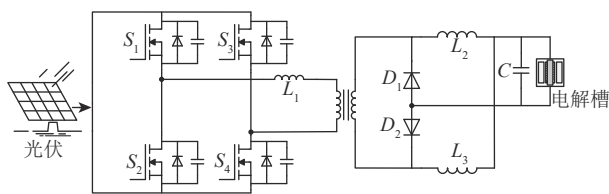


图3 全桥DC/DC变换器

Fig. 3 Full-bridge DC/DC converter

的电路效率。相对于半桥拓扑，全桥拓扑在大功率应用中更具有优势，但是它的开关器件更多、控制更加复杂，会进一步增加制氢电源成本。

1.1.4 全桥谐振DC/DC变换器-PEM电解槽

通过在变压器一次侧引入谐振电路构成适用于PEM电解槽的全桥谐振变换器拓扑^[29]，如图4所示。该变换器没有占空比丢失现象、可以实现全负载范围的零电压开通，有较宽的电压输出范围，能够满足PEM电解槽输出宽电压范围的需求，提高系统制氢效率^[30]，但是谐振电路存在较大的循环电流。

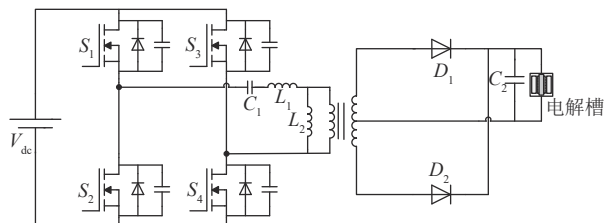


图4 全桥谐振DC/DC变换器

Fig. 4 Full-bridge resonant DC/DC converter

1.1.5 三电平半桥ZVS DC/DC变换器-RES耦合电解槽

适用于RES与电解槽互联的三电平半桥零电压开关(zero voltage switch, ZVS) DC/DC变换器拓扑^[31]如图5所示。由于该变换器引入带耦合电感的倍流整流器，使二极管和变压器二次绕组电流降低2倍，降低了变换器二次侧损耗。此外，该变换器固有零电压开关，有效地提高了电解制

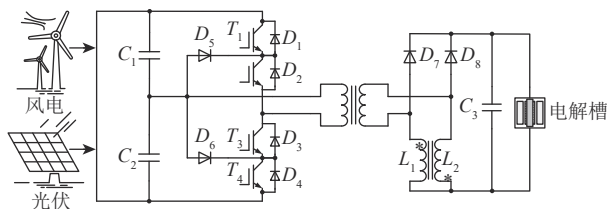


图5 三电平半桥ZVS DC/DC变换器

Fig. 5 Three-level half-bridge ZVS DC/DC converter

氢效率。虽然该变换器器件数量相对较多，但是在设计和操作上相对简单。

1.1.6 推挽式DC/DC变换器-光伏耦合电解槽

适用于光伏制氢系统的推挽式DC/DC变换器拓扑^[32]如图6所示。该变换器结构和控制简单，具有低电流纹波、高降压比等优点，能够更好地兼容光伏电源。但是由于采用硬切换的方式，导致变换器效率有所降低，开关器件的电压应力升高，此外，中心抽头变压器结构过于复杂，因此该变换器在大功率制氢场合受到限制。

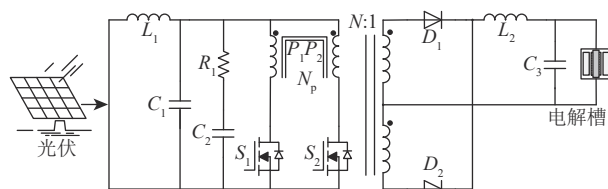


图6 推挽式DC/DC变换器

Fig. 6 Push-pull DC/DC converter

1.2 两级型

1.2.1 两级式降压型DC/DC变换器-光伏耦合电解槽

适用于离网间接耦合型光伏制氢系统的大功率降压型两级式DC/DC变换器拓扑^[33]如图7所示。该变换器前级采用飞跨电容型多电平结构，具有功率转换效率高、纹波低、开关损耗小等优点，能够更灵活地匹配光伏阵列和电解槽的I-V曲线，提高光伏制氢系统效率，但是在使用时需要预充电，并且结构复杂，前后级变换器需要分别进行控制。

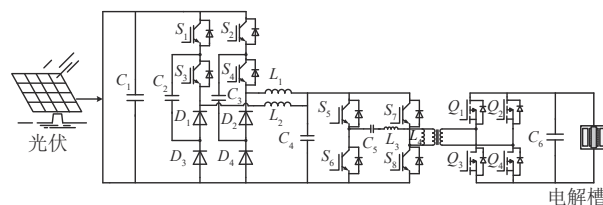


图7 两级式降压型DC/DC变换器

Fig. 7 Two-stage step-down DC/DC converter

1.2.2 DCX两级式DC/DC变换器-光伏耦合电解槽

适用于离网光伏制氢系统的DCX两级式DC/DC变换器拓扑^[34]如图8所示。该变换器具有高电

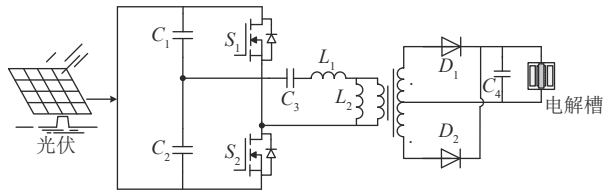


图8 DCX两级式DC/DC变换器
Fig. 8 DCX two-stage DC/DC converter

压转换比、在较宽功率范围内保持高效率等优点,满足光伏制氢系统需要工作在宽输出电压范围的特点,可以实现电解槽的高效制氢,但是必须使用恒流源供电且电流纹波大,需要加装滤波器。

1.2.3 带电容输出滤波器的两级Boost LLC串联谐振变换器-RES耦合电解槽

一种带电容输出滤波器的两级Boost LLC型串联谐振变换器拓扑^[35]如图9所示。其中后级变换器没有占空比损失、效率高也不存在振铃问题,能够使电解槽更好地耦合RES的直流母线。当输入低电压时必须使用低的谐振电感,因此变换器前级采用ZVT Boost结构提高输入电压,使变换器在开关工作范围内实现零电压开关,但是两级结构控制复杂。

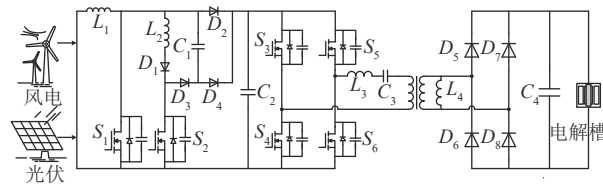


图9 带电容输出滤波的两级Boost LCL串联谐振变换器
Fig. 9 Two-stage Boost LCL series resonant converter with capacitor output filter

1.3 并联型

1.3.1 基于Y型三相交错并联LLC谐振变换器-PEM电解槽

适用于PEM电解槽的一种基于Y型三相交错并联LLC谐振变换器拓扑^[36]如图10所示。该变换器将高频变压器设计为2个变压器,并采用一次侧串联、二次侧并联的方式来实现输出大电流、低纹波,采用交错并联的方式降低开关管的电流应力,能够满足PEM电解槽大电流、低电压的需求,适用于新能源发电电解水制氢场合,但是变换器结构复杂,投入成本高。

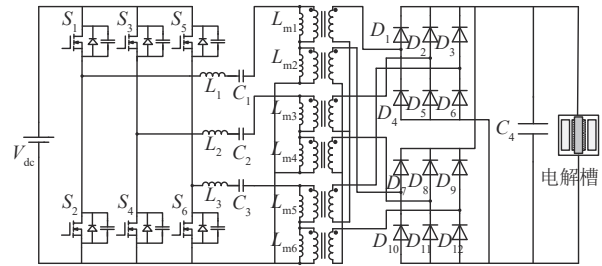


图10 基于Y型三相交错并联LLC谐振变换器
Fig. 10 Y-type three-phase staggered parallel LLC converter

1.3.2 双有源桥集成Boost变换器-光伏耦合电解槽

适用于光伏制氢系统的双有源桥(dual active bridge, DAB)集成Boost变换器拓扑^[37]如图11所示。该变换器通过对多个DAB串并联,构成输入串联、输出并联型变换器。该变换器输入侧串联提高了输入电压等级;输出侧并联提高了传输功率等级,能够更好地满足系统中光伏的降本增效,并且由于变换器在不同运行模式中可能存在Boost电路,能够更容易地切除故障,但是变换器结构复杂,成本更高。

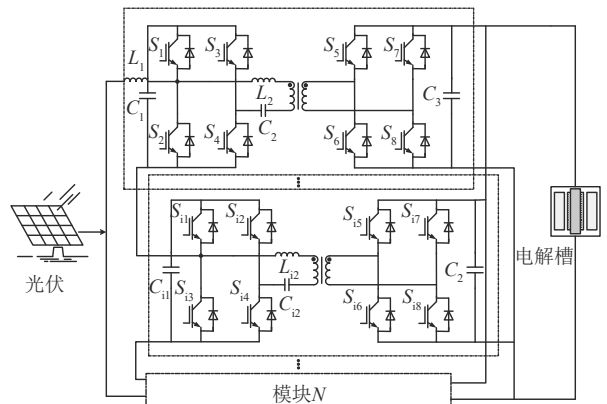


图11 双有源集成Boost变换器
Fig. 11 Dual active integrated Boost converter

1.4 多端口型

1.4.1 多端口氢储能DC/DC变换器

适用于分布式能源系统(distributed energy system, DES)的多端口氢储能DC/DC变换器拓扑^[38]如图12所示。该变换器有2个单向低压端口用于电解槽和燃料电池的互联,一个高压双向端口用于与DES互联。应用多端口技术既能减少功率转换阶段,又能满足集中控制需求,提高电解

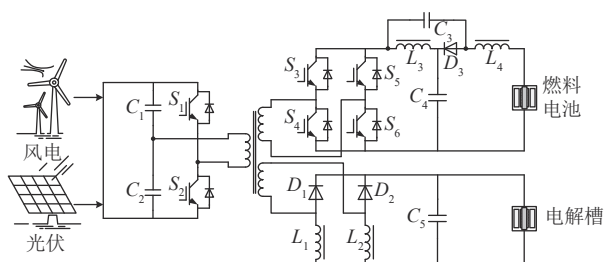


图12 多端口氢储能DC/DC变换器

Fig. 12 Multi-port hydrogen energy storage DC/DC converter

制氢效率，能够更好地耦合DES和HESS。

1.4.2 新型多端口氢储能DC/DC变换器

图13为适用于RES的新型多端口DC/DC变换器拓扑^[39]。相对于DES多端口变换器，RES多

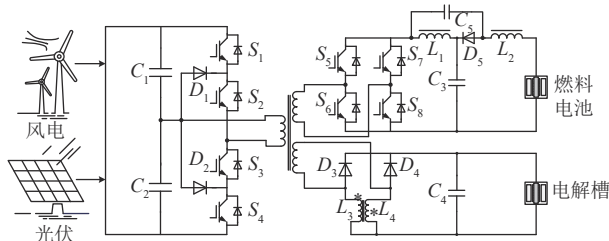


图13 新型多端口氢储能DC/DC变换器

Fig. 13 A novel multi-port hydrogen energy storage DC/DC converter

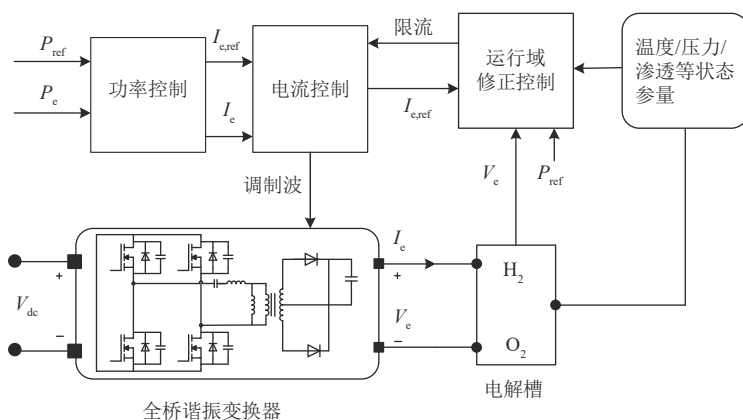


图14 DC/DC变换器考虑温度和压强的协调控制

Fig. 14 DC/DC converter considering temperature and pressure coordination control

2.2 分布式电-氢耦合集成化多端口变换器

2.2.1 变换器拓扑

针对小型化分布式电-氢耦合场景，本文推荐采用高效率、高集成化多端口变换器(一般以三端口为主)。相对于采用多个二端口变换器分别连接HESS各部分，多端口变换器可以直接耦合RES

端口变换器将半桥结构替换为三电平中性点箝位(3L-NPC)逆变器，使变换器损耗减少25%以上，能够为电解槽提供稳定电压，更好地耦合RES和HESS系统，但是多端口变换器大多存在功率耦合现象。

2 DC/DC隔离型制氢电源发展趋势

2.1 适应复杂工况的大功率规模化制氢电源

针对未来可再生能源宽范围、强波动复杂工况电解制氢电源的巨大需求，推荐全桥谐振变换器，通过引入谐振电路实现全负载范围的零电压开通，提高系统制氢效率。该变换器没有占空比损失并且具有较宽的电压输出范围，能够更好地满足电解槽大功率、低电压、大电流、宽输出电压范围的要求，适用于未来可再生能源宽范围、强波动的复杂工况。此外，考虑到控制系统的完整性，全桥谐振变换器的控制器通过调节电网侧电流控制参考功率，为满足制氢系统的协调控制，综合考虑电解槽物理工况约束，在控制有功功率和无功功率的同时，还应该考虑电解槽温度、压力、氢/氧交叉渗透反馈对控制系统的影响^[40]，如图14所示。

和HESS，这样既能减少功率，转换阶段、提高系统效率又能满足功率集成转换和集中控制的需求^[41-42]，优化氢储能系统的动态性能，使系统高度集成化，为隔离型DC/DC制氢电源的发展提供了一种可行方案。

图15为应用于RES耦合HESS的一种基于移

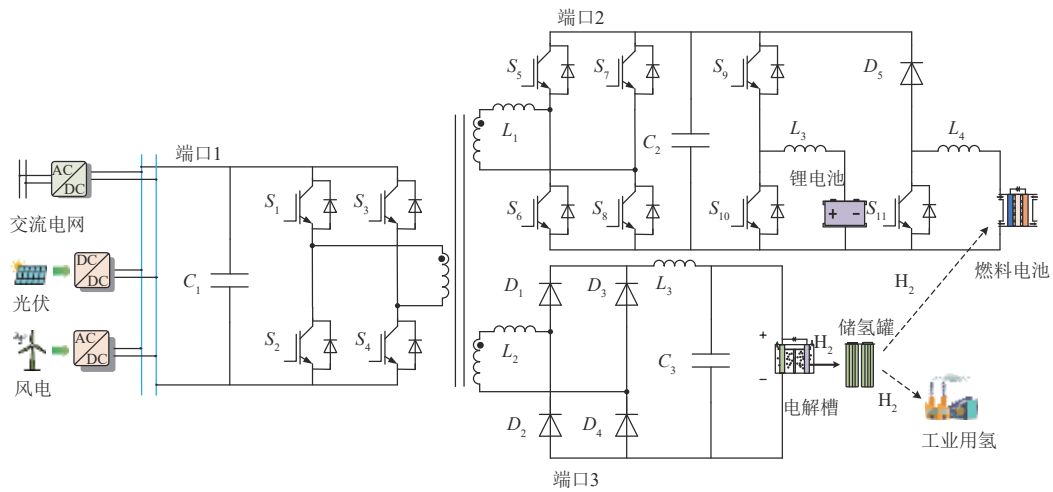


图15 隔离型三端口DC/DC变换器

Fig. 15 Isolated three-port DC/DC converter

相全桥变换器和双有源桥变换器的三端口隔离型DC/DC变换器。该变换器有一个高压双向端口(端口1)用于三端口变换器与RES互联, 2个低压单向端口(端口2、3)用于燃料电池与电解槽互联。

2.2.2 功率解耦

为了最小化三端口变换器各端口间的循环功率, 独立控制各端口功率流动^[43-44], 采用如下解耦算法, 如图16和公式(1)所示。

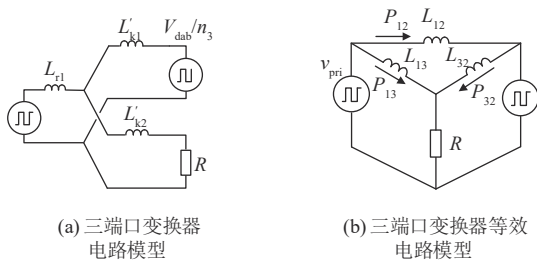


图16 三端口隔离型DC/DC变换器功率解耦

Fig. 16 Three-port isolated DC/DC converter power decoupling

$$\begin{cases} L_{12} = L_{r1} + L'_{k1} + \frac{L_{r1} L'_{k1}}{L'_{k2}} \\ L_{13} = L_{r1} + L'_{k2} + \frac{L_{r1} L'_{k2}}{L'_{k1}} \\ L_{32} = L'_{k1} + L'_{k2} + \frac{L'_{k1} L'_{k2}}{L_{r1}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_{r1} 为一次侧漏感; L'_{k1} 和 L'_{k2} 分别为端口2、3折算到一次侧参数; L_{12} 、 L_{13} 和 L_{32} 分别为经过星角变换后各端口间参数。

由式(1)可知, 通过减小一次侧漏感 L_{r1} 可以实现功率解耦^[45], 因此令 $L_{r1} \approx 0$ 来实现该三端口变换

器硬件上固有的功率解耦。

2.2.3 工作模式

在用电低谷时段, 可再生能源除供给电网用电外, 将多余电能通过三端口变换器用于电解制氢储存起来; 在用电高峰时段, 燃料电池将储存的氢气转换为电能, 通过三端口变换器供给电网使用。因此, 三端口隔离型DC/DC变换器有6种工作模式, 如图17所示。RES制氢模式: 电解槽在允许功率波动范围内吸收可再生能源, 或在电网需要时提供调频调峰辅助服务。RES+电池制氢模式: 电池与可再生能源共同为电解槽供电; 电池制氢模式: 燃料电池/锂电池单独为电解槽供电

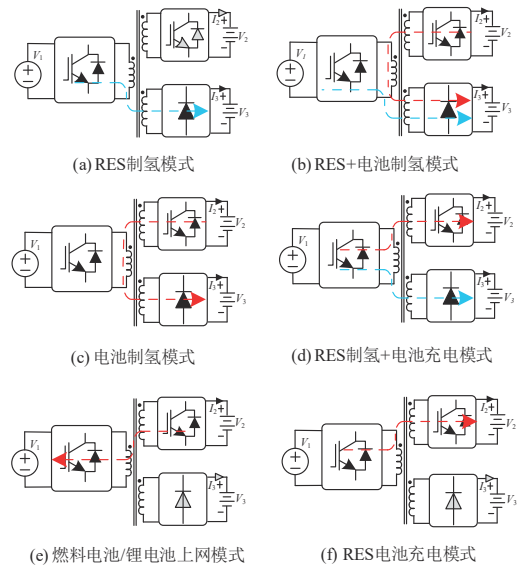


图17 三端口隔离型DC/DC变换器工作模式

Fig. 17 Three-port isolated DC/DC converter operating modes

保持电解槽热备用。RES制氢+电池充电模式：当可再生能源功率波动大于制氢允许功率波动时，利用电池储存能量以平衡可再生能源剩余功率。燃料电池/锂电池上网模式：当电网需要深度调峰或调频辅助服务时，燃料电池/锂电池放电。RES电池充电模式：电池消纳可再生能源并网剩余电量。

3 结论

从DC/DC隔离型制氢电源拓扑角度进行总结分析，根据电源结构不同，主要分为单级型、两级型、并联型和多端口型，分别应用于不同的制氢场景，结论如下：

1) 由于单级型变换器开关管数量较少，对应的损耗相对较小，普遍具有高降压比，但是开关管的应力较大，因此仅适用于中小功率制氢场合。

2) 两级型变换器效率高，适用于大功率的高效制氢场合，但是由于前后两级需要分别控制，导致变换器结构复杂、成本高。

3) 并联型变换器多采用输入串联、输出并联的结构，适用于输入电压等级高、输出大功率、大电流场合，但是变换器结构复杂。

4) 多端口型变换器一般以三端口变换器为主，既能够满足单级变换、紧凑封装，又能满足高效的热管理和集中控制的需求，普遍适用于新能源耦合HESS的制氢场合。

参考文献

- [1] 杨希特. 中国发展氢能社会的构想[J]. 智库理论与实践, 2022, 7(5): 159-165.
YANG X T. The idea of developing a hydrogen society in China[J]. Think Tank: Theory & Practice, 2022, 7(5): 159-165.
- [2] 刘尚泽, 于青, 管健. 氢能利用与产业发展现状及展望[J]. 能源与节能, 2022(11): 18-21.
LIU S Z, YU Q, GUAN J. Current situation and prospects of hydrogen energy utilization and industrial development[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(11): 18-21.
- [3] 李建林, 李光辉, 郭丽军, 等. “十四五”规划下氢能应用技术现状综述及前景展望[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 10-16.

- LI J L, LI G H, GUO L J, et al. Overview and prospect of hydrogen energy application technology under the 14th Five Year Plan[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(6): 10-16.
- [4] 赵剑波, 王蕾. “十四五”构建以新能源为主体的新型电力系统[J]. 中国能源, 2021, 43(5): 17-21.
ZHAO J B, WANG L. The “14th Five-Year Plan” build on new energy sources as the main body of the new power system[J]. Energy of China, 2021, 43(5): 17-21.
- [5] 朱凯, 张艳红. “双碳”形势下电力行业氢能应用研究[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 65-72.
ZHU K, ZHANG Y H. Research on application of hydrogen in power industry under “double carbon” circumstance[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 65-72.
- [6] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 89-99.
XU C B, LIU J G. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: application value, challenges, and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 89-99.
- [7] PAN G, GU W, LU Y, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.
- [8] 刘坚, 钟财富. 我国氢能发展现状与前景展望[J]. 中国能源, 2019, 41(2): 32-36.
LIU J, ZHONG C F. The development status and prospect of hydrogen energy[J]. Energy of China, 2019, 41(2): 32-36.
- [9] NIE J, CHEN Y, BOEHM R F, et al. A photoelectrochemical model of proton exchange water electrolysis for hydrogen production[J]. Journal of Heat Transfer, 2008, 130(4): 156-161.
- [10] 李雪临, 袁凌. 海上风电制氢技术发展现状与建议[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 198-206.
LI X L, YUAN L. Development status and suggestions of hydrogen production technology by offshore wind power[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 198-206.
- [11] KUMAR S S, HIMABINDU V. Hydrogen production by PEM water electrolysis-A review[J]. Materials Science for Energy Technologies, 2019, 2(3): 442-454.
- [12] 许卫, 李桂真, 马长山. 大规模电解水制氢系统的发展现状[J]. 太阳能, 2022(5): 33-39.
XU W, LI G Z, MA C S. Development status of

- large-scale water electrolysis system for hydrogen production[J]. *Solar Energy*, 2022(5): 33-39.
- [13] CARMO M, FRITZ D L, MERGEL J, et al. A comprehensive review on PEM water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(12): 4901-4934.
- [14] FALCAO D S, PINTO A. A review on PEM electrolyzer modelling: guidelines for beginners[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121184.
- [15] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(2): 146-152.
YU H M, SHAO Z G, HOU M, et al. Hydrogen production by water electrolysis: progress and suggestions[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(2): 146-152.
- [16] 闫娜, 李宝昕, 贾宏刚, 等. 关于氢综合利用系统在西安地区宾馆类场景中的配置方法研究[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(11): 87-93.
YAN N, LI B X, JIA H G, et al. A study on the configuration of hydrogen comprehensive utilization system for the hotel-type scenario in Xi'an[J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2021, 37(11): 87-93.
- [17] 卢一菲, 陈冲, 梁立中. 基于电-氢混合储能的风氢耦合系统建模与控制[J]. *智慧电力*, 2020, 48(3): 7-14.
LU Y F, CHEN C, LIANG L Z. Modeling and control of wind-hydrogen coupling system based on electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. *Smart Power*, 2020, 48(3): 7-14.
- [18] 侯慧, 戈翔迪, 吴细秀, 等. 运行与规划协同的电热氢联供系统最优容量配置研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 144-151.
HOU H, GE X D, WU X X, et al. Optimal capacity allocation of an electricity heat hydrogen cogeneration system based on coordinated operation and planning[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 144-151.
- [19] KOPONEN J, RUUSKANEN V, KOSONEN A, et al. Effect of converter topology on the specific energy consumption of alkaline water electrolyzers[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 34(7): 6171-6182.
- [20] RUUSKANEN V, KOPONEN J, KOSONEN A, et al. Power quality and reactive power of water electrolyzers supplied with thyristor converters[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 459: 228075.
- [21] 徐立军, 王维庆, 段友莲, 等. 用DC/DC变换器进行光伏直接耦合制氢的优化方法[J]. *电源技术*, 2018, 42(11): 1668-1671.
XU L J, WANG W Q, DUAN Y L, et al. Optimized method of photovoltaic generator-water electrolyser direct coupling through DC/DC converter[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2018, 42(11): 1668-1671.
- [22] LI N, ZHAO X, SHI X, et al. Integrated energy systems with CCHP and hydrogen supply: a new outlet for curtailed wind power[J]. *Applied Energy*, 2021, 303: 117619.
- [23] TAKAHASHI R, KINOSHITA H, MURATA T, et al. Output power smoothing and hydrogen production by using variable speed wind generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 57(2): 485-493.
- [24] 蔡国伟, 孔令国, 薛宇, 等. 风氢耦合发电技术研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(21): 127-135.
CAI G W, KONG L G, XUE Y, et al. Review of wind-hydrogen coupled power generation technology[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(21): 127-135.
- [25] 郭小强, 魏玉鹏, 万燕鸣, 等. 新能源制氢电力电子变换器综述[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(20): 185-199.
GUO X Q, WEI Y P, WAN Y M, et al. Review of new energy hydrogen generation power electronic converter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(20): 185-199.
- [26] BLINOV A, ANDRIJANOVITS A. New DC/DC converter for electrolyser interfacing with stand-alone renewable energy system[J]. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2013, 1(1): 24-29.
- [27] VITALE G, CASTALDI F, GUILBERT D. Design of a LLC resonant converter for powering a PEM electrolyzer[J]. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2021, 19: 452-458.
- [28] CAVALLARO C, CHIMENTO F, MUSUMECI S, et al. Electrolyser in H₂ self-producing systems connected to DC link with dedicated phase shift converter[C]//2007 International Conference on Clean Electrical Power. IEEE, 2007: 632-638.
- [29] 范泽锐. 基于PEM电解槽LLC隔离型DC/DC谐振变换器设计研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2022.
FAN Z R. Design and research of LLC isolated DC/DC resonant converter based on PEM electrolyzer[D]. Beijing: North China University of Technology, 2022.
- [30] CHANDRASEKHAR P, REDDY S R. Design of LCL resonant converter for electrolyser[J]. *Annals of Dunarea De Jos*, 2010, 33(1): 278-291.
- [31] ANDRIJANOVITS A, VINNIKOV D, ROASTO I, et al. Three-level half-bridge ZVS DC/DC converter for electrolyzer integration with renewable energy systems [C]//2011 10th International Conference on Environment

- and Electrical Engineering. IEEE, 2011: 1-4.
- [32] GARRIGOS A, BLANES J M, CARRASCO J A, et al. 5 kW DC/DC converter for hydrogen generation from photovoltaic sources[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(12): 6123-6130.
- [33] 钱尼信. 光伏制氢系统大功率降压型DC/DC变换器研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
QIAN N X. Research on high power buck DC/DC converter for photovoltaic-hydrogen production system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [34] CONCHA D, RENAUDINEAU H, HERNANDEZ M S, et al. Evaluation of DCX converters for off-grid photovoltaic-based green hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(38): 19861-19870.
- [35] GAUTAM D S, BHAT A K S. A comparison of soft-switched DC-to-DC converters for electrolyzer application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(1): 54-63.
- [36] 周京华, 孟祥飞, 陈亚爱, 等. 基于新能源发电的电解水制氢直流电源研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 389-397.
ZHOU J H, MENG X F, CHEN Y A, et al. Research on DC power supply for hydrogen production from electrolytic water based on new energy generation [J]. Solar Energy, 2022, 43(6): 389-397.
- [37] 孙孝峰, 张绘欣, 张涵, 等. 一种用于电-氢多能互补型微电网的双有源桥集成Boost拓扑及其控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2092-2104.
ZHANG X F, ZHANG H X, ZHANG H, et al. Topology and control strategy of dual active bridge integrated boost circuit for electro-hydrogen multi-energy complementary microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 2092-2104.
- [38] VINNIKOV D, ANDRIJANOVITS A, ROASTO I, et al. Experimental study of new integrated DC/DC converter for hydrogen-based energy storage[C]//2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE, 2011: 1-4.
- [39] ANDRIJANOVITS A, BLINOV A, HUSEV O, et al. Multiport converter with integrated energy storage for hydrogen buffer interfacing with renewable energy systems[C]//2012 IEEE International Conference on Industrial Technology. IEEE, 2012: 230-235.
- [40] NGUYEN B L H, PANWAR M, HOVSAPIAN R, et al. Power converter topologies for electrolyzer applications to enable electric grid services[C]//IECON 2021-47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2021: 1-6.
- [41] 杨旭. 光储发电系统三端口DC/DC变换器硬解耦与控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
YANG X. Research on hardware-decoupling and control method of three-port DC/DC converter for PV-storage generation system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [42] TAO H, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Multiport converters for hybrid power sources[C]//2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE, 2008: 3412-3418.
- [43] HUANG X, WANG Z, KONG Z, et al. Modular multilevel converter with three-port power channels for medium-voltage drives[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 6(3): 1495-1507.
- [44] PHATTANASAK M, GAVAGSAZ-GHOACHANI R, MARTIN J P, et al. Control of a hybrid energy source comprising a fuel cell and two storage devices using isolated three-port bidirectional DC-DC converters[J]. IEEE transactions on Industry applications, 2015, 1(1): 491-497.
- [45] FALCONES S, AYYANAR R, MAO X. A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(5): 2192-2203.

收稿日期: 2023-01-03。

作者简介:



孔令国

孔令国(1984), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电-氢耦合理论与关键技术, klgwin@neepu.edu.cn;



宫健

宫健(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电-氢耦合理论与关键技术, 2661075638@qq.com。

(责任编辑 杨阳)