

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.04.008

## 多端口变换器及其解耦策略关键技术综述

乐宇, 夏志鹏, 王悦, 吴馨, 刁春燕

(国网马鞍山供电公司, 安徽 马鞍山 243000)

**摘要:** 直流微电网结合电源、储能、负载等多种形式的端口, 可实现多种情况下的孤岛和并网运行模式, 因而被广泛运用于连接交流电网。将多组变换器并联于直流母线上, 会导致系统冗余、控制复杂、效率低下。为了实现多个不同形式端口的整合, 多端口直流变换器应运而生。从多端口变换器拓扑出发, 综述现有各类多端口变换器的派生, 简单介绍其结构, 并对其功能、优缺点进行分析。其中, 全隔离型多端口变换器由于各端口之间相互独立且共用一根磁力母线, 具有较高的可靠性, 还可实现宽范围电压输入及软开关, 得到国内外广泛关注。多端口变换器各端口之间输入输出功率流存在耦合, 会导致变换器工作在较低的效率范围内。通过对现有的三种应用于多端口网络的解耦方法依次进行介绍, 并结合相应的拓扑进行对比分析, 谐振解耦通过构建谐振拓扑结构来达到物理解耦的方法, 相对简单, 在稳态及暂态下均具有较好的性能。

**关键词:** 直流微电网; 多端口变换器; 解耦策略; 谐振

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1007-9904(2024)04-0072-09

## Overview of Multiport Converters and Its Decoupling Strategies Key Technologies

LE Yu, XIA Zhipeng, WANG Yue, WU Xin, DIAO Chunyan

(State Grid Ma'anshan Power Supply Company, Ma'anshan 243000, China)

**Abstract:** The DC microgrid, combined with various forms of ports such as power supply, energy storage, and load, can operate in islanding and grid-connected modes in various situations and is widely used to connect to the AC power grid. Multiple sets of converters are connected in parallel to the DC bus, which will lead to redundancy system, complex control, and low efficiency. By integrating multiple different forms of ports, multi-port DC converters have emerged. This article starts off the presentation with the topology of multi-port converters and the overview of the derivatives of various existing multi-port converters, and then briefly introduces their structures, and analyzes their function, advantages and disadvantages. With the merits of higher reliability and the ability to achieve wide range voltage input and soft switching, the fully isolated multi-port converters, which are independent and sharing a common magnetic bus, has been widely concerned at home and abroad. Due to the coupling of input and output power flow between multiple ports of the converter, it has low efficiency. Three existing decoupling methods applied to multi-port networks were introduced in sequence, and how to decouple them was compared and analyzed based on the corresponding topology. Resonant decoupling achieves physical decoupling by constructing a resonant topology structure, which is relatively simple and effective, with the good performance of transient and steady-state.

**Keywords:** DC microgrid; multi-port converter; decoupling strategy; resonance oscillation

### 0 引言

能源是为社会发展和科技进步提供能量的资源<sup>[1-2]</sup>。煤、石油、天然气都是目前使用广泛的不可再生能源, 由于相对的稳定性和较高的经济收益, 被广泛应用于居民生活、工业生产等各个领域。目前我国能源消耗主要是电力供应<sup>[3]</sup>。许多区域的电网结构已经纵横交错, 扩大电网的容量受到较大限制,

因此新能源产业的发展成了能源供应系统的有效补充手段, 既能解决化石燃料消耗与排放问题, 也可将可再生能源进行充分消纳<sup>[4]</sup>。

分布式发电的发展, 虽然解决了新型能源开发与利用, 但这些新型能源易受环境因素的影响, 不能保证正常稳定的输出。若直接将电能馈入电网, 对电网冲击大, 降低电网运行的安全性<sup>[5]</sup>。为解决上述问题, 直流微网扮演着重要的中间环节, 用来衔接

大电网和分布式电源。直流微网可以工作在孤岛和并网状态下,孤岛状态由微网单独给负载提供能量,并网状态下,微网接受电网的能量并将能量传递给负载。直流微网因其高效性和高可靠性而被广泛应用<sup>[6-7]</sup>。图1为一种典型的直流微网结构,集成了交流电网、发电单元、储能单元、交直流负载,通过变换器连接共用直流母线,进行能量的分配和传输。发电单元一般为光能、风能等分布式电源。储能单元一般分为两大类,一类是具有高功率密度的超级电容,动态特性较好,短时间充放电功率大;另一类是目前运用广泛的高能量密度蓄电池,常用于长时间的充放电,功率密度较低,负载的快速变化会影响电池的寿命。二者被广泛应用于直流微网中,蓄电池用于长时间能量的自平衡,超级电容器用于短时间内浪涌功率的补偿<sup>[8-9]</sup>。直流微网如果采用多组变换器,会使整个系统结构非常复杂,难以控制,效率较低。

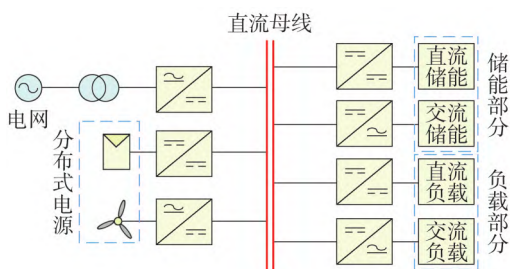


图1 直流微网结构

Fig.1 Structure of DC microgrid

为解决多个变换器的冗余问题,多端口变换器的概念应运而生。图2所示的结构将电网、新能源发电单元、储能单元紧密联系在一起,将能量提供给本地负载,与基于多个换流器的微电网相比,采用多端口换流器共用一条磁母线可以有效减少可再生能源系统的电压转换级数、规模和成本,并隔离转换端口。新拓扑利用集中的系统级控制,形成更快和更灵活的能量管理,并且提出的多端口直流微网也能在多种并网和孤岛运行模式下运行。

多端口变换器一般超过三个端口,端口之间的能量传输会出现单对多、多对单、多对多三种情况。多个端口之间功率的传输,会出现功率耦合现象,使得整个系统控制精度低,动态特性较差。为解决上

述问题,对多端口变换器拓扑结构的改进及解耦方法的研究就显得尤为重要。文中综述基于现有的不同类型多端口变换器及解耦方法的研究现状,分析其在实际应用中存在的问题,为研究多端口变换器拓扑和解耦方法提供参考。

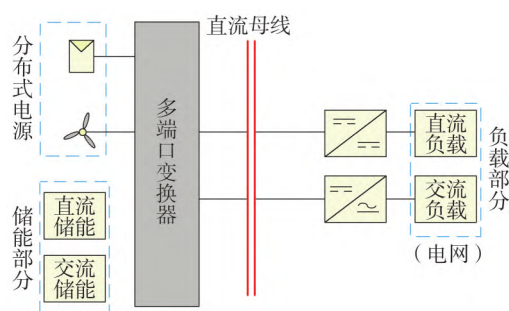


图2 直流微网多端口结构

Fig.2 The structure of DC microgrid with multiple ports

## 1 直流多端口拓扑分类

直流多端口变换器由于结构简单、功率密度高,便于进行集中系统性的控制,在新能源和航天领域都有广泛的应用。直流变换器具体分为非隔离型、半隔离型、全隔离型三种。

### 1.1 非隔离型

非隔离型多端口变换器相对于半隔离型和全隔离型变压器,没有采用变压器进行电气隔离,但非隔离型的变换器拓扑结构简单,功率密度较高,易于进行控制。2002年文献[10]首次提出一种非隔离型的多端口结构,拓扑结构如图3所示。 $S_1$ — $S_6$ 为开关管且共同构成三相全桥结构, $L_1$ — $L_3$ 为滤波电感, $C_1$ 为滤波电容, $u_4$ 为直流负载或直流电源电压, $u_1$ — $u_3$ 分别为燃料电池发电机、超级电容器及电池系统的电源电压。文献[10]中,将三组电源整合,用于组合混合动力汽车,给出了多种车载能量的功率流,但并未对该系统的控制及功率流进行过多研究。

2005年,文献[11]设计一种用于电动汽车推进系统的多输入变换器结构,拓扑结构如图4所示。该系统包括一个燃料电池发电机和一个组合存储单元,组合存储单元将超级电容箱和电池单元进行组合,并设计了相应的能量管理单元,进行功率流的管理。该结构在控制上有了一定程度的改善,但该阶段的电力电子器件接口发展尚不成熟,温度过高使

其电源和存储单元特性变化,从而导致变换器运行方式较差,运行性能不能达到最大化。因此,一种新的宽范围电压输入非隔离型多端口拓扑被提出,重新规划各端口功率流,解决了光伏不稳定及蓄电池电压约束的问题<sup>[12]</sup>。

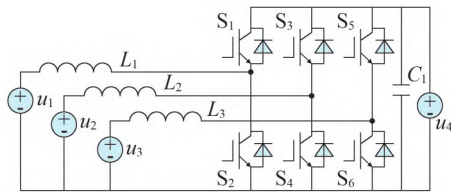


图3 三半桥非隔离型多端口拓扑  
Fig.3 Three half-bridge non-isolated multi-port topology

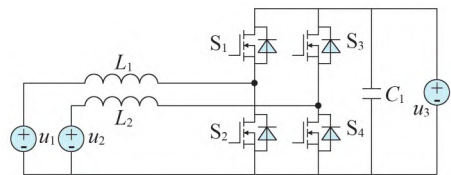


图4 两半桥非隔离型多端口拓扑  
Fig.4 Two half-bridge non-isolated multi-port topology

由于非隔离型变换器缺少变压器进行电气隔离,系统可靠性较低。这类拓扑虽然采用的开关管数量较少,但端口之间功率冗杂,开关管之间无法协调配合,实现的运行方式较为单一。

### 1.2 半隔离型

为了方便系统控制,对变换器的部分端口进行整合,一般将电源部分和存储单元进行整合,与另一端利用变压器进行电气隔离,引出了半隔离型多端口变换器,也叫部分隔离型多端口变换器,这种变换器同时具备了非隔离型多端口变换器和隔离型多端口变换器的优点。2005年,文献[13]提出一种半隔离型的多端口变换器,拓扑结构如图5所示, $S_1$ 、 $S_2$ 及 $S_3$ 、 $S_4$ 分别构成两组半桥。这种拓扑结构仅使用了两组半桥,相对简单,利用缓冲电容和变压器漏感来实现软开关,减少了有源开关和无源谐振元件,并且通过调节两组半桥的占空比和移相角进行潮流控制,但电源电压的输入范围有限。

文献[14]提出另一种三半桥半隔离多端口结构,拓扑结构如图6所示,这种拓扑结构采用三组半桥,将电源和负载进行隔离,电源部分各采用两组升压半桥,实现了宽电压范围的输入,燃料电池和超级电容

器能够吸取和注入平滑的电流,使得端口间干扰减小。

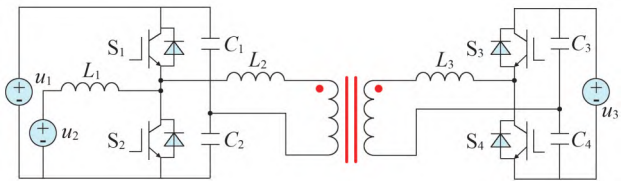


图5 两半桥半隔离型多端口拓扑  
Fig.5 Two half-bridge half-isolated multi-port topology

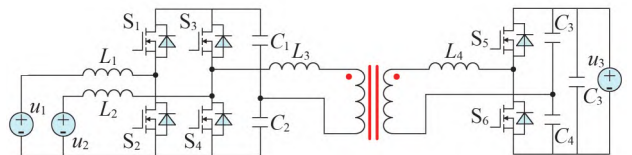


图6 三半桥半隔离型多端口拓扑  
Fig.6 Three half-bridge half-isolated multi-port topology

2018年哈尔滨工业大学提出一种新式混合储能系统的三端口变换器<sup>[15]</sup>,结构如图7所示,其对应端口有蓄电池、超级电容、直流微网或直流负载。这种拓扑结构可使端口工作在宽电压范围,且端口采用交错式的电感结构,能减小电流纹波,漏感可实现开关管的软开关,降低了开关损耗。文中还基于此拓扑采用下垂控制进行了相关分析。

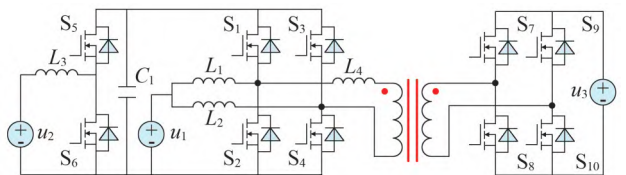


图7 混合储能系统储能多端口变换器  
Fig.7 Energy storage multi-port converter in the hybrid energy storage system

开关管数量增加,导致系统冗余。为了优化控制及提高系统功率密度,半隔离型多端口变换器出现了较多的派生拓扑<sup>[16-17]</sup>。南京航空航天大学在此拓扑结构方面做了许多研究,来减少开关管数量,文献[18]提出一种拓扑结构,其对应端口有光伏电源、蓄电池、负载,光伏电源和蓄电池端口共用全桥提高了有源器件的共享率和功率密度,采用脉冲宽度调制加二次侧移相控制来实现解耦。并联电感能减小循环电流及电流纹波。利用开关管和二极管来箝位

输出电压,可以有效减小开关管的电压应力,同时减少开关管的数量。

半隔离型多端口变换器一般将电源和储能端口进行整合,与负载端口之间实现电气隔离,但无法实现所有端口之间的电气隔离,可靠性降低。同时,电源及储能共用一个端口也会导致变压器一侧的开关管应力较大,效率降低。

### 1.3 全隔离型

全隔离型多端口变换器,就是每一个端口之间都进行了电气隔离,通过设计变压器的匝数比,实现各个端口不同的电压等级,每个端口的工作电压范围都相对宽泛。

2004年埃因霍芬理工大学最早提出三端口全隔离型端口变换器,结构如图8所示。文献[19]针对该变换器进行分析,该变换器由一个三绕组的高频变压器和三组全桥组成,三绕组每个边的漏感为能量传递的元件,通过调节三个端口的移相角来改变功率的大小和传输的方向。储能单元一般为蓄电池或者超级电容。通过移相调节,发电单元给储能单元、负载和电网进行充电,储能单元用于功率自平衡,但是这种拓扑结构用于宽范围电压输入时,会导致部分开关丧失软开关特性。文献[20]提出在电压范围变化较大的一侧引入占空比控制,实现了全功率范围下所有开关管的软开关,并且减小了变换器中的有功环流。文献[21]则是提出在所有端口都加入占空比控制,降低了变换器的损耗,提高了变换器的效率,但是对于变换器的控制更加趋于复杂化。目前,全隔离型全桥多端口变换器运行模式和过程控制的研究已较为完善,文献[22]针对多负载切换的工况,重新建模与分析系统稳定性,使得系统稳态与动态性能提升。

近年来,智能微电网技术的发展对可靠性和超常规控制技术提出了越来越高的要求,利用高频磁链能有效减少转换级,所以全隔离型全桥多端口变换器也被广泛研究和运用于微电网之中。文献[23]是结合了全隔离型全桥多端口变换器的一种微电网结构,拓扑电路如图9所示,其对应端口有燃料电池、蓄电池、光伏、电网,这种结构可以有效结合各端口,通过控制三个端口的移相角来控制功率的流向,并通过调节占空比,来使得光伏达到最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)。文献[24]针

对上述微电网结构,对每个端口的拓扑进行具体介绍并给出相应的控制框图。文献[25]根据这个拓扑结构,进一步设计了一种模糊控制能量管理单元,根据实时和预测数据进行能量的管理。

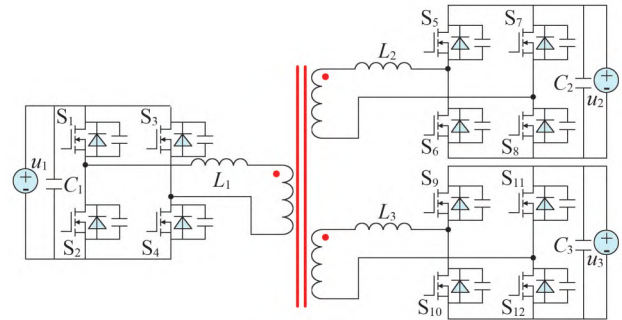


图8 全隔离型全桥多端口变换器

Fig.8 Fully isolated full bridge multi-port converter

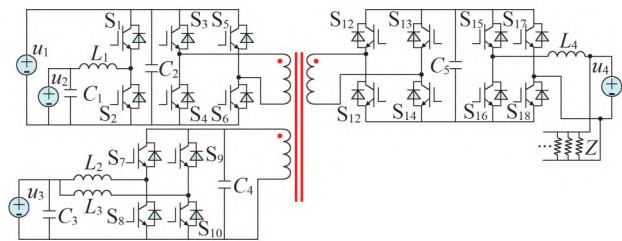


图9 一种智能微电网结构图

Fig.9 The structure diagram of an intelligent microgrid

基于全隔离型全桥多端口变换器无法在宽范围电压下实现软开关,2008年埃因霍芬理工大学基于全桥多端口变换器提出一种半桥型的多端口变换器<sup>[26]</sup>,该变换器拓扑结构如图10所示,通过将一个电感结构与升压半桥连接,调节合适的占空比与另外两个半桥进行补偿,保持半桥的电压恒定。采用脉宽调制,降低导通损耗,同时解决了全隔离型全桥多端口变换器无法在宽范围电压输入下实现软开关的问题。

非隔离型多端口变换器结构简单,成本较低,控制较为单一,多组形式端口无法同时工作。半隔离型多端口变换器结合了部分端口,形成电气隔离,系统输入电流纹波较大,无法实现宽范围电压输入。全隔离型多端口变换器能有效利用高频磁链,并且每个端口之间形成电气隔离,有利于软开关及多种控制方式的实现,提升系统可靠性。这种拓扑能有

效处理发电—储能—负荷之间的功率流,一直是国内外研究的重点。

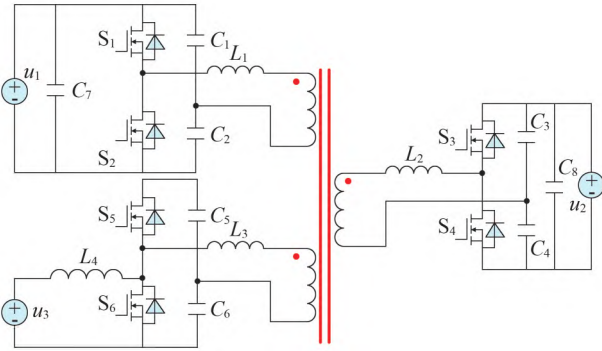


图10 全隔离型半桥多端口变换器

Fig.10 Fully isolated half-bridge multi-port converter

## 2 解耦策略

现代化工业生产出现了复杂的设备和装置。这些设备和装置在控制时设置的控制参数相对较多,确定的输出参数也较多,所以需要设置多个控制回路来对设备进行控制。但是每一个控制回路之间相互影响,每一个输入参数会影响所有的输出参数,每一个输出参数又会影响所有的输入参数,这就是耦合作用。耦合的出现会使整个控制系统稳定性变差,难于控制。所以解耦策略的实施是必不可少的,将相对简单和耦合程度相对较低的多输入-多输出控制回路进行线性化,简化成单输入-单输出控制回路,从而实现通过调节单一输入量来调整单一输出量,使系统动态性能得到改善。

针对多端口变换器的解耦方式一般分为三种:传统解耦控制、改变带宽解耦、利用谐振解耦。

### 2.1 传统解耦控制

传统的解耦控制一般用于线性时不变系统,主要是将复杂的耦合关系通过传递函数的增益矩阵形式表达,然后建立相应的解耦矩阵使得输入变量与输出变量之间的传递函数矩阵形成对角矩阵,从而使得整个系统进行解耦,适用于所有直流多端口变换器。针对传统的全隔离型全桥多端口变换器,端口间的移相角  $\varphi_{12}$  和  $\varphi_{13}$  为输入变量,输出变量为二次侧输出电压  $u_o$  和一次侧输入功率  $P_i$ ,而移相角  $\varphi_{12}$  和  $\varphi_{13}$  的变化会导致两个输出端口变量的变化。文献[27]采用解耦矩阵与增益矩阵乘积为对角矩阵进行

解耦,相应的对角解耦网络如图11所示。 $I_{p120}$ 、 $I_{p130}$  分别代表第二、第三端口电流的有效值,  $\Delta I_{p120}$ 、 $\Delta I_{p130}$ 、 $\Delta\varphi_{12}$ 、 $\Delta\varphi_{13}$  分别为相应变量的小扰动量,  $\Delta\varphi_{120}$ 、 $\Delta\varphi_{130}$  为解耦后的移相角小扰动量。

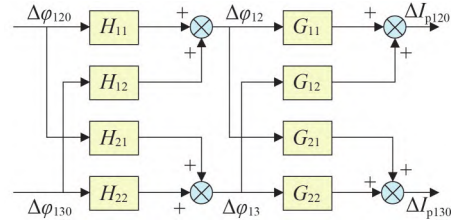


图11 对角阵解耦网络图

Fig.11 Network diagram of diagonal matrix decoupling

根据解耦矩阵与增益矩阵的乘积为对角矩阵,得到相应的表达式为

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $G_{11}$ 、 $G_{12}$ 、 $G_{21}$ 、 $G_{22}$  分别为输出量  $I_{p120}$ 、 $I_{p130}$  对输入量  $\varphi_{12}$ 、 $\varphi_{13}$  求偏导,表示为  $G_{11} = \frac{\partial \Delta I_{p130}}{\partial \Delta \varphi_{12}}$ 、 $G_{12} = \frac{\partial \Delta I_{p130}}{\partial \Delta \varphi_{13}}$ ,

$G_{21} = \frac{\partial \Delta I_{p120}}{\partial \Delta \varphi_{12}}$ 、 $G_{22} = \frac{\partial \Delta I_{p120}}{\partial \Delta \varphi_{13}}$ ;  $H_{11}$ 、 $H_{12}$ 、 $H_{21}$ 、 $H_{22}$  为解耦矩阵元素。

从而求得解耦矩阵相应的表达式为

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_{11}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} & \frac{-G_{12}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \\ \frac{-G_{11}G_{21}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} & \frac{G_{11}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

若设置的对角矩阵为单位阵,则表达式可简化为

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \begin{bmatrix} G_{22} & -G_{12} \\ -G_{21} & G_{11} \end{bmatrix} \quad (3)$$

文献[20-21]采用的是传统的前馈补偿解耦方式,结构相对简单,前馈补偿的解耦控制如图12所示。

根据前馈补偿解耦的要求,应消除某一控制回路对另一控制回路的影响,则可以得到表达式为

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{120}G_{21} + \Delta\varphi_{120}H_{21}G_{22} = 0 \\ \Delta\varphi_{130}G_{12} + \Delta\varphi_{130}H_{12}G_{11} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

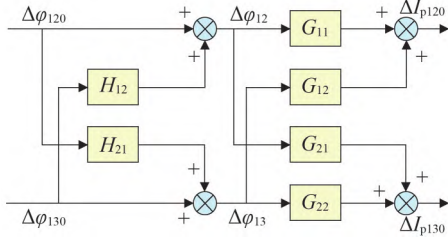


图12 前馈补偿解耦控制图

Fig.12 Control diagram for feedforward compensation decoupling

进行相应的代数计算即可得到相应的前馈解耦网络的参数为

$$\begin{cases} H_{21} = -\frac{G_{21}}{G_{22}} \\ H_{12} = -\frac{G_{12}}{G_{11}} \end{cases} \quad (5)$$

文献[28]是针对无线电能下多端口,分离出电压和功率两个因素来建立小信号模型和解耦矩阵,但整个变换器效率仍然偏低。传统的解耦策略相对简单,但误差较大,如所求参数偏离稳定点较大,仍然会有较大的耦合影响。

## 2.2 改变带宽解耦

传统解耦策略目前存在较大偏差,国内外学者提出一种改变带宽进行解耦的方法。多端口变换器一般由响应速度较慢的电压环和响应速度较快的电流内环组成。当出现耦合作用时,通过调节带宽来使得整个控制系统具有更加动态的性能。改变带宽的解耦方法一般运用于非隔离型多端口变换器和通过脉宽调制的控制功率流拓扑中。文献[29]将改变带宽的解耦策略运用于一种半桥三端口变换器,并且给出了一种竞争策略的功率控制方法。该方法分析输入量与输出量之间的耦合关系,通过改变带宽和应用传统解耦控制变量,从而实现多个端口之间的解耦。占空比  $d_1$  和  $d_2$  为输入变量,输出变量为二次侧输出电压  $u_o$  和一次侧输入电压  $u_i$ ,而占空比  $d_1$  和  $d_2$  的变化会导致两个输出变量的变化。

系统各端口稳态端电压关系为

$$\begin{cases} u_i = (1 + d_2/d_1)u_2 \\ u_o = nd_1u_i + n(d_2 - d_1)u_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $n$ 为变压器原副边匝数比; $u_2$ 为第二端口电压。

通过建立扰动的小信号模型,建立输入输出的扰动表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta u_i \\ \Delta u_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{31} & G_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \end{bmatrix} = \mathbf{G}_1 \mathbf{D}^* \quad (7)$$

式中: $\Delta u_i$ 、 $\Delta u_o$ 分别为其输入输出电压小扰动量; $G_{11}$ 、 $G_{12}$ 、 $G_{31}$ 、 $G_{32}$ 为输入占空比与输出电压之间的传递函数的元素; $\Delta d_1$ 、 $\Delta d_2$ 分别为占空比的小扰动量, $\mathbf{D}^* = [\Delta d_1 \ \Delta d_2]^T$ ;传递函数  $\mathbf{G}_1$  为非对角化矩阵。

$$\begin{cases} \Delta u_i = G_{11}\Delta d_1 + G_{12}\Delta d_2 \\ \Delta u_o = G_{31}\Delta d_1 + G_{32}\Delta d_2 \end{cases} \quad (8)$$

由输入输出控制矩阵得到表达式为

$$\begin{cases} G_{12}\Delta d_2 = 0 \\ G_{31}\Delta d_1 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

只要将两组参数中输入变量减小至接近于零,就可实现解耦。采用调整带宽使扰动量  $\Delta d_1$  为零,  $\Delta d_2$  不为零,通过建立解耦矩阵使得  $G_{12}$  减小或接近于零,从而实现解耦。实验结果表明,整个环路之间耦合作用虽然没有完全消除,但却大大降低。

## 2.3 利用谐振解耦

全隔离型全桥多端口变换器被广泛研究,系统存在的耦合效应成了不容忽视的问题。由于传统解耦方法得到的控制系统性能较差,许多学者通过添加谐振元件来减小电路的耦合程度,以提高整个系统的响应速度和开关器件的利用率,还通过带有谐振元件的拓扑电路来进行软开关的研究。文献[30]通过在全隔离型全桥多端口变换器增加一个串联电容  $C_r$ ,利用谐振电容的容性电抗来实现隔直作用,来减小电路的耦合程度,进一步实现解耦,拓扑电路如图13所示。

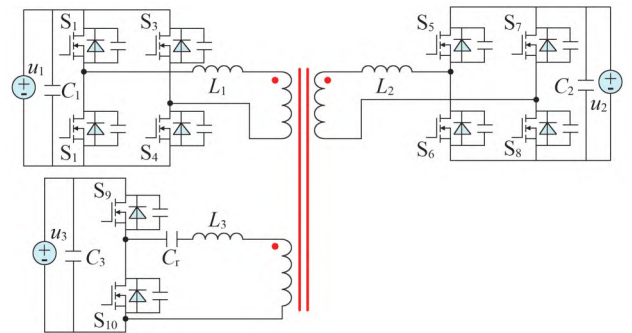


图13 串联谐振网络的多端口变换器拓扑

Fig.13 Multi-port converter topology for series resonant networks

对应端口有发电单元、负载、储能单元。利用谐振电容  $C_r$  将流过电感的电流基波分量进行谐振,从而达到减小储能单元对应端口的等效传输电感,使得发电单元对应端口到负载对应端口之间的等效阻抗增大,流过发电单元对应端口和负载对应端口之间的传输功率就会减小,发电单元对应端口发出的功率只能流向储能单元对应端口,从而控制了功率的流向,实现三个端口的解耦。

在一个端口增加谐振虽然实现了解耦,但却定向控制了功率的流向,使得端口的发电单元无法直接给端口的负载进行能量传输。文献[31]提出一种双串联谐振双向多端口变换器,拓扑电路如图14所示,这种拓扑网络更容易实现软开关,且具有更高的开关效率。文献[32]在此电路的基础上,选择合适的开关频率和谐振频率比值,从而抑制端口之间耦合程度。

由于两谐振槽的谐振电流均与输出侧漏感有关,输出侧漏感越大时,整个电路的耦合程度越高。对于本拓扑电路,当开关频率与谐振频率接近时,整个谐振槽的阻抗较小,两个端口之间耦合程度较大。通过控制变量,验证了拓扑网络的耦合程度与输出侧漏感和开关频率与谐振频率比值有关。在电路中选择合适的输出侧漏感和开关频率可使网络的耦合程度达到最小,达到解耦。

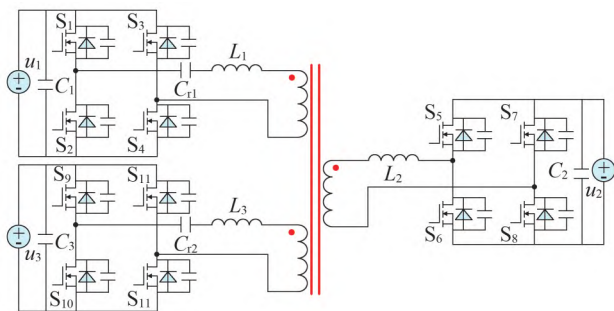


图14 双串联谐振网络的多端口变换器拓扑  
Fig.14 Multi-port converter topology of dual series resonant networks

文献[33]提出另一种双串并联谐振网络多端口变换器拓扑,拓扑电路如图15所示。该拓扑网络增加了两个LCLC多谐振腔,由一组谐振电感、电容串联再与另一组并联谐振电感、电容串联组成。通过调整变换器的工作频率可以使变换器在全负载范围

实现软开关和高效率。这证明该拓扑电路的耦合程度与并联谐振电容和驱动频率有关,并通过控制变量的方法,证明了耦合程度与并联谐振电容呈正相关,而与驱动频率呈负相关。文献[34]是基于此电路拓扑进行电压、电流特性分析以及变换器的设计。

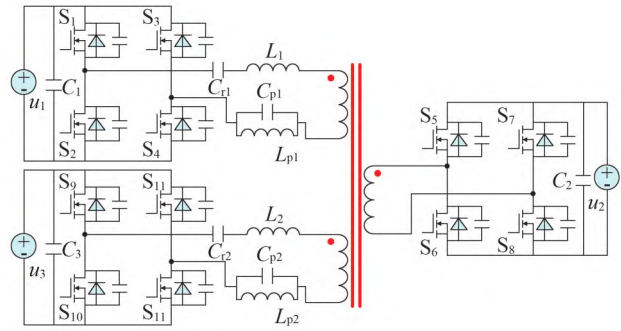


图15 双串并联谐振网络的多端口变换器拓扑  
Fig.15 Multi-port converter topology for double series parallel resonant networks

此外,由于双向全桥DC-DC变换器的发展,将预测控制应用于双向全桥DC-DC变换器具有更优的动态和稳态性能。文献[35-36]将预测电流移相控制应用于双向全桥DC-DC变换器中,通过在开关管的动作时刻进行电感电流采样,但在采样时的高频信号会对整个采样过程有影响,导致每次电感电流采样都会存在误差,造成误差的积累。文献[37]将预测电流移相控制应用于多端口变换器当中,但未考虑到变压器中有直流偏磁,导致电感电流中含有直流分量。文献[38]将预测电流移相控制应用于全隔离型全桥的多端口变换器中,并通过更新上升沿和下降沿的移相比消除直流偏置,并提出了半开关周期采样和全开关周期采样两种采样方式。

### 3 结束语

文中主要对多端口变换器的发展进行综述,对多端口变换器的类型及多端口变换器的解耦策略进行介绍。给出多端口变换器种类及各类派生拓扑,比较分析各种多端口变换器,并对各类拓扑的结构及功能优缺点进行分析。全隔离型多端口变换器由于具有较高的可靠性、宽范围电压输入、软开关等优点而被广泛研究。对于拓扑多端口之间存在的耦合作用,给出多种应用于不同网络下的解耦策略,利用

谐振解耦具有较好的动态性能,可以将耦合程度降到最低,预测相移和脉宽变化的方法也可融入目标函数中,能有效避免闭环控制系统过程冗杂的问题,值得进一步研究。

## 参考文献

- [1] 周篁.关于我国可再生能源发电的问题及对策研究[J].电网技术,2001,25(7):1-3.  
ZHOU Huang. Research on the problems and countermeasures of renewable energy power generation in China [J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 1-3.
- [2] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响[J].电力系统及其自动化,2001,53-56.  
LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 53-56.
- [3] 王玥娇,张兴友,郭俊山.储能技术在高比例可再生能源电力系统中的应用[J].山东电力技术,2021,7(48):19-25.  
WANG Yuejiao, ZHANG Xingyou, GUO Junshan. Review on the application of energy storage technology in power system with high proportion of renewable energy [J]. Shandong Electric Power, 2021, 7(48): 19-25.
- [4] 廖怀庆,刘东,黄玉辉.考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析[J].中国电机工程学报,2012,32(16):9-16.  
LIAO Huaiqing, LIU Dong, HUANG Yuhui. Analysis of smart grid transfer capacity considering the integration of new energy generation and energy storage devices [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 9-16.
- [5] 周林,黄勇,郭珂,等.微电网储能技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2011,39(7):147-152.  
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. Overview of research on micro grid energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [6] 李建林,田立亭,来小康.能源互联网背景下的电力储能技术展望[J].电力系统及其自动化,2015,39(23):15-25.  
LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Prospects of electric power energy storage in the context of energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15-25.
- [7] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.  
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Review on key technologies of dc microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [8] 张纯江,董洁,刘君,等.蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J].电工技术学报,2014,29(4):334-340.  
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. Control strategy for hybrid energy storage system of battery and supercapacitor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [9] 陈和洋,周金平,何春庆,等.基于物联网技术的变电站蓄电池设备数据采集系统研究[J].山东电力技术,2022,1(49):30-40.  
CHEN Heyang, ZHOU Jinping, HE Chunqing, et al. Research on data collection system of storage battery equipment in substation based on internet of things technology [J]. Shandong Electric Power, 2022, 1(49): 30-40.
- [10] NAPOLI A D, CRESCIMBINI F, RODO S, et al. Multiple input DC-DC power converter for fuel-cell powered hybrid vehicles [C] // IEEE Power Electronics Specialists Conference, Cairns, 2002: 1685-1690.
- [11] SOLERO L, LIDOZZI A, POMILIO J A. Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(5): 1007-1016.
- [12] 高圣伟,祝庆同.一种独立光储发电系统用宽输入范围非隔离三端口变换器[J].电工技术学报,2023,38(4):970-982.  
GAO Shengwei, ZHU Qingtong. A wide input range non-isolated three-port converter for stand-alone PV storage power generation system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 970-982.
- [13] SU G J, PENG F Z. Triple-voltage bus DC-DC converter for automotive applications [C] // Power Electronics Conference and Exposition, Austin, 2005: 1015-1021.
- [14] TAO H M, KOTSOPoulos A, DUARTE J L, et al. Multi-input bidirectional DC-DC converter combining DC-link and magnetic-coupling for fuel cell systems [C] // Industry Applications Conference, Hongkong, 2005: 2021-2028.
- [15] WANG P B, ZHANG X C, DING S B, et al. An isolated three-port DC-DC converter with low-voltage dc bus for dc microgrids [C] // IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2018.
- [16] 孙孝峰,刘飞龙,熊亮亮,等.双Buck/Boost集成双有源桥三端口DC-DC变换器[J].太阳能学报,2016,31(22):73-82.  
SUN Xiaofeng, LIU Feilong, XIONG Liangliang, et al. Dual buck/boost integrated dual active bridge three port DC-DC converter [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 31(22): 73-82.
- [17] 吴红飞,胡文斐,邢岩.并联交错式三端口半桥变换器[J].中国电机工程学报,2014,34(12):1829-1835.  
WU Hongfei, HU Wenfei, XING Yan. Parallel series interleaved three port half bridge converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1829-1835.
- [18] ZHANG J J, WU H F, QIN X Q, et al. PWM plus secondary-side phase-shift controlled soft-switching full-bridge three-port converter for renewable power systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7061-7072.
- [19] 潘子周.隔离型多端口桥式直流变换器软开关技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [20] TAO H M, KOTSOPoulos A, DUARTE J L, et al. Transformer-



- coupled multiport ZVS bidirectional DC-DC converter with wide input range[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2):771-781.
- [21] ZHANG C H, ROUND S D, KOLAR J W. An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5):2243-2453.
- [22] 张晓达,王韧秋,陈金香.三端口双向DC-DC变换器多模态切换建模与分析[J].中国电机工程学报,2018,38:209-214.  
ZHANG Xiaoda, WANG Renqiu, CHEN Jinxiang. Multi-modality switch modeling and analysis for bidirectional DC-DC converters with three-ports[J].Proceedings of the CSEE, 2018, 38:209-214.
- [23] JAFARI M, MALEKJAMSHID Z, LEI G, et al. Design and implementation of an amorphous high-frequency transformer coupling multiple converters in a smart microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2):1028-1037.
- [24] JAFARI M, MALEKJAMSHID Z, ZHU J G. Design, analysis and control of a magnetically-coupled multi-port multi-operation-mode residential micro-grid [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, Sydney, 2017:13-19.
- [25] JAFARI M, MALEKJAMSHID Z, LU D C, et al. Development of a fuzzy-logic-based energy management system for a multiport multioperation mode residential smart microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4):3283-3301.
- [26] TAO H M, DUARTE J L, HENDRIX M, Three-port triple-half-bridge bidirectional converter with zero-voltage switching [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2):782-792.
- [27] 王政,储凯,张兵,等.移相占空比控制的三端口双向直流变换器[J].电机与控制学报,2015,19(7):81-87.  
WANG Zheng, CHU Kai, ZHANG Bing, et al. Three port bidirectional DC converter with phase shift duty cycle control[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(7):81-87.
- [28] 宋钊,刘明.模块化多端口无线电能DC-DC变换器建模及其多向功率流解耦控制策略[J].电工技术学报,2022,37(24):6262-6271.  
SONG Zhao, LIU Ming. Modular multiport wireless DC-DC converter with multidirectional power flow and its decoupling control strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24):6262-6271.
- [29] 张君君,吴红飞,曹峰,等.半桥式三端口变换器建模与解耦控制[J].中国电机工程学报,2015,35(3):671-678.  
ZHANG Junjun, WU Hongfei, CAO Feng, et al. Modeling and decoupling control of half bridge three port converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3):671-678.
- [30] 杨旭,王卫,王盼宝,等.基于串联谐振网络的三端口DC/DC变换器解耦方法[J].电网技术,2017,41(2):478-485.  
YANG Xu, WANG Wei, WANG Panbao, et al. Decoupling method for three port DC-DC converter based on series resonance network [J]. Power System Technology, 2017, 41(2):478-485.
- [31] KRISHNASWAMI H, MOHAN N. Three-port series-resonant DC-DC converter to interface renewable energy sources with bidirectional load and energy storage ports [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(10):2289-2297.
- [32] 孙孝峰,薛利,孟宇飞,等.双串联谐振双向三端口DC/DC变换器选频解耦控制研究[J].太阳能学报,2015,36(6):1459-1467.  
SUN Xiaofeng, XUE Li, MENG Yufei, et al. Research on frequency selection decoupling control of dual series resonant bidirectional three port DC/DC converter [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(6):1459-1467.
- [33] 李微,周雪松,马幼捷,等.三端口直流微网母线电压控制器及多目标控制[J].电工技术学报,2019,34(1):92-102.  
LI Wei, ZHOU Xuesong, MA Youjie, et al. Three port DC microgrid bus voltage controller and multi-objective control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1):92-102.
- [34] 李微,王议锋,韩富强,等.一种隔离型三端口双向LCLC多谐振直流变换器[J].电工技术学报,2018,33(14):3231-3244.  
LI Wei, WANG Yifeng, HAN Fuqiang, et al. An isolated three port bidirectional LCLC multi resonant DC converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14):3231-3244.
- [35] DUTTA S, HAZRA S, BHATTACHARYA S. A digital predictive current-mode controller for a single-phase high-frequency transformer - isolated dual-active bridge DC-to-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9):5943-5952.
- [36] HUANG J, WANG Y, LI Z. Predictive valley-peak current control of isolated bidirectional dual active bridge DC-DC converter [C] // Energy Conversion Congress and Exposition, Montreal, 2015:1467-1472.
- [37] CHATTOPADHYAY R, ACHARYA S, GOHIL G, et al. One switching cycle current control strategy for triple active bridge phase-shifted DC-DC converter [C] // 2017 IEEE Industry Applications Society annual Meeting, Cincinnati, 2017:1-8.
- [38] 张国荣,李智,陆笠,等.三端口DC-DC变换器预测电流移相控制[J].电力系统保护与控制,2019,47(13):8-17.  
ZAHNG Guorong, LI Zhi, LU Li, et al. Predictive current phase shift control for three port DC-DC converter [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13):8-17.

收稿日期:2023-04-23

修回日期:2023-08-22

作者简介:

乐宇(1990),男,工程师,主要从事电力系统继电保护工作;  
夏志鹏(1997),男,硕士,主要从事电力系统继电保护工作;  
王悦(1995),女,工程师,主要从事电力系统继电保护工作;  
吴馨(1988),男,硕士,工程师,主要从事电力系统继电保护工作;  
刁春燕(1997),女,硕士,主要从事电力系统继电保护工作。

(责任编辑 马艳)