

# 电力电子变压器在风力发电系统中的应用研究综述

关金萍, 徐永海

(新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 电力电子变压器不仅可以减小传统变压器磁性材料的用量,而且具有补偿无功功率、改善电能质量和限制故障电流等功能。优越的性能使其在交直流配电网与能源互联网中得到广泛研究,随着研究的深入,将其替代传统的工频变压器作为风力发电系统中电网和风力发电机组接口的研究,也逐渐引起关注。本文首先对应用于风力发电系统的电力电子变压器主电路拓扑结构进行了分析;然后总结了电力电子变压器的高质量供电与源荷友好接入特性,指出其在风力发电系统中的应用价值;重点对基于电力电子变压器接口的永磁风机和双馈风机风力发电系统的研究现状进行了较为全面地阐述,并对今后需要重点研究的问题提出了建议。

**关键词:** 电力电子变压器; 风力发电系统; 双馈感应电机; 永磁同步电机

**DOI:** 10.12067/ATEEE1801060      **文章编号:** 1003-3076(2019)02-0088-09      **中图分类号:** TM4

## 1 引言

在过去的十几年中,风电在电网中的渗透率不断增长。2006年全球风电总装机容量为73.9GW,2016年已高达486.8GW<sup>[1]</sup>。随着大规模风电的接入,风电对电力系统的影响将不容忽视。

目前,风力发电系统通过工频变压器并网。工频变压器具有结构简单、抗冲击能力强和可靠性高等优点。但是其功能单一,只能实现不同交流电压等级之间的变换和电气隔离,而且体积大、重量重。此外,变压器内的绝缘油会污染环境,且不容易维护;不能有效地隔离负荷侧的故障;变压器铁芯饱和时,容易产生较大的励磁涌流等。应用于风电场的工频变压器需要特殊的继电保护配置和更高的结构设计强度。这就使得对变压器进行革新尤为重要。

为了省去风力发电系统中体积庞大的工频变压器,不少学者提出了新的拓扑结构。文献[2]提出了一种适用于风力发电系统的中压大功率模块化换流器拓扑结构,省去了网侧工频变压器,但是每个换流器单元需要一对具有90°移相角的发电机绕组,传统的三相发电机无法满足要求。文献[3]提出了一种适用于海上风电场的基于级联型电流源换流器

的永磁风力发电系统拓扑结构,直流侧电流参考值由直流侧功率获得,省去了长距离通信线路,虽然不需要在海上安装工频变压器,节省建造成本,但仍要在海岸上通过工频变压器接入电网。文献[4]提出了一种基于高频变压器和模块化换流器的中压(10kV)大功率永磁风力发电系统拓扑结构,但未对其进行细致的分析。文献[5]提出了一种基于矩阵换流器的电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)应用于风力发电系统的结构。电力电子变压器是一种结合电力电子变换器和高频变压器的电能传输设备,又称固态变压器<sup>[6]</sup>(Solid State Transformer, SST)、智能通用变压器<sup>[7]</sup>(Intelligent General Transformer, IGT)等,其不仅可以显著减小系统磁性材料的用量,而且集电气隔离、电压变换、无功补偿等功能于一身,是未来智能电网的关键设备。基于PET接口的风力发电系统的初期研究工作聚焦于鼠笼感应电机风力发电系统,通过仿真证明了所提出的拓扑结构的有效性,能满足有功功率传输、无功功率补偿和电压变换的要求,但没有进行故障穿越能力分析<sup>[8]</sup>。文献[9]提出一种基于PET的永磁同步风力发电机并网系统,在高压直流侧增加超级电容储能装置,使风电机组具备较强的低电

收稿日期: 2018-01-22

基金项目: 北京市自然科学基金项目(3172036)

作者简介: 关金萍(1994-),女,满族,黑龙江籍,硕士研究生,研究方向为电力电子变压器控制与应用;  
徐永海(1966-),男,河南籍,教授,博导,研究方向为电力电子技术、电能质量分析与控制。

压穿越能力。文献[10]建立了基于 PET 的永磁同步风力发电系统的实验样机,证明了系统功率调节功能的有效性。类似的,文献[11]提出了一种基于 PET 的双馈感应电机风力发电系统,并通过仿真验证了 PET 的无功补偿功能。

国内外学者的研究表明基于 PET 接口的风力发电系统有很多优势。首先,基于 PET 接口的风力发电系统可以提供低压直流母线形成低压直流微网,汇集附近的负载<sup>[10]</sup>。其次,一方面,PET 隔离级采用高频变压器可以显著减小磁性材料的用量,从而减少工频变压器在运输、安装、占地和维护等方面的成本,甚至有可能将 PET 放置在风机塔顶的机舱内,减少下垂电缆电流在传输过程中的损耗;另一方面,在实现电压变换、有功功率传输、电气隔离等基本功能的情况下,可以补偿无功功率、改善电能质量和限制故障电流等<sup>[11]</sup>。

本文结合国内外研究现状,首先介绍了应用于风力发电系统的 PET 拓扑结构,对现有拓扑结构进行分析和比较。然后阐述了 PET 的高质量供电与源荷友好接入特性。重点介绍了 PET 在风力发电系统中的应用情况,包括永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) 风力发电系统和双馈感应电机 (Doubly Fed Induction Generation, DFIG) 风力发电系统。最后,对 PET 应用在风力发电系统研究中需要关注的问题进行了探讨。

## 2 电力电子变压器的拓扑结构

现有研究中常根据电能变换的次数这一通用准则对 PET 拓扑结构进行分类。文献[12,13]不考虑高频变压器的 AC/AC 变换环节,将 PET 分为单级型、双级型和三级型。但高频变压器在实现 AC/AC 电能变换的过程中也会产生损耗,文献[14]将高频变压器单独作为 PET 电能变换的一个环节,把 PET 分为三级型、四级-I 型、四级-II 型和五级型 4 种基本类型。本文采用文献[14]的分类方式研究 PET 的拓扑结构,并对其在风力发电系统中的应用进行总结。就目前研究而言,基于 PET 接口的风力发电系统大多采用五级型拓扑结构<sup>[10,11,15-18]</sup>。五级型拓扑包括整流级的 AC/DC 变换、隔离级的 DC/AC/AC/DC 变换和逆变级的 DC/AC 变换,可同时提供高压直流母线和低压直流母线,是目前应用较为广泛的拓扑,不仅可以实现无功补偿和电压跌落补偿,还可以实现可再生能源和储能设备的接入等功

能<sup>[19-22]</sup>。

在电力系统高压大功率应用场合,五级型拓扑由于受到功率器件和磁性材料的限制,实际中多采用模块级联型拓扑<sup>[19,20]</sup>、模块化多电平型拓扑<sup>[21,22]</sup>和中点钳位型拓扑<sup>[23,24]</sup>。

模块级联型 PET 拓扑结构如图 1 所示,整流级采用 H 桥换流器,由低压模块串联构成,不仅可以提高 PET 的输入电压等级,还可以提高等效的开关频率;隔离级采用双有源桥 (Dual Active Bridge, DAB),通过对高频变压器两端全桥的移相控制,实现了电压等级变换、电气隔离、能量的双向传输等功能;逆变级采用全桥逆变器,为用户提供高电能质量的交流电,还可以提供无功功率,甚至为特殊场合提供不同于电网的电压幅值或频率的电能。文献[25]提出了一种适用于中高压配电网的高功率密度谐振型级联 H 桥 PET 拓扑,利用串联谐振的选频作用,实现了一台高频变压器对应多个 H 桥模块,简化了现有中高压 PET 结构。在基于 PET 接口的风力发电系统的研究中,学者们广泛采用了模块级联型拓扑结构<sup>[8,10,11,16,17]</sup>

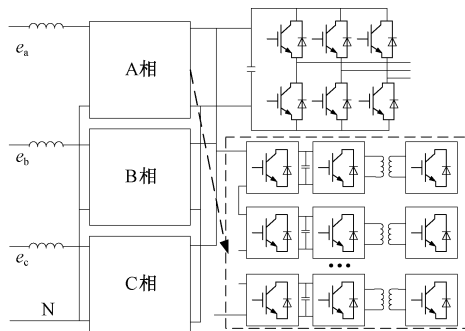


图 1 模块级联型 PET 拓扑

Fig. 1 Modular cascade PET topology

模块化多电平型 PET 拓扑结构如图 2 所示,和模块级联型 PET 拓扑结构类似,区别是整流级采用模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC)。相比模块级联型 PET 拓扑,模块化多电平型 PET 拓扑能提高直流输出电压质量、显著减少高频变压器用量和减少电力电子开关器件的数量<sup>[26,27]</sup>。文献[28]基于模块化多电平型 PET 拓扑,提出了一种适用于配电网孤岛模式运行特性的 PET 自治运行控制策略,充分发挥了 PET 各个端口能量互通、相互支撑的优势。

为了减少储能电容和功率器件的数量,进一步提高 PET 的功率密度,中点钳位型 PET 拓扑也得到

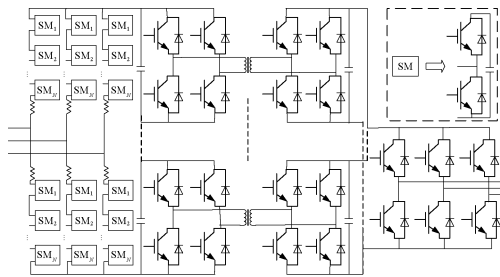


图 2 模块化多电平型 PET 拓扑  
Fig. 2 Module multilevel PET topology

了广泛关注<sup>[29]</sup>。文献[24]采用中点钳位型 PET 拓扑研制了 20kV·A 的单相 PET 样机。但基于 PET 接口的风力发电系统几乎没有采样此类拓扑,因此本文不对其详述。

文献[30]根据隔离级 DAB 的不同结构,将 PET 拓扑分为 4 类:DAB 两侧均采用全桥的拓扑如图 3 (a)所示、DAB 两侧均采用半桥的拓扑如图 3(b)所

示以及 DAB 一次侧采用半桥和二次侧采用全桥的拓扑如图 3(c)所示,一种新型的基于 Boost 变换的拓扑如图 3(d)所示,这四种 PET 拓扑在系统损耗、器件数量、成本、高频变压器附加需求等方面进行比较,部分比较结果见表 1。相比拓扑图 3(a),拓扑图 3(b)和拓扑图 3(c)在一定程度上减少了器件数量,但也必然要求器件具有更高的电流等级;拓扑图 3(b)和拓扑图 3(c)对应的高频变压器具有最低的漏电感,同时带来了体积和损耗的增加;对于拓扑图 3(a)、图 3(b)和图 3(c),每个模块的总损耗是近似的,效率也是相近的,拓扑图 3(d)每个模块的损耗仅为拓扑图 3(a)的 1/3,效率是最高的,然而也需要更多的器件,因此成本也是最高的。目前,拓扑图 3(a)广泛应用于基于 PET 接口的风力发电系统中<sup>[8,10,11,15-17]</sup>,文献[17]首次采用基于拓扑图 3(b)的 PET 接入风力发电系统。

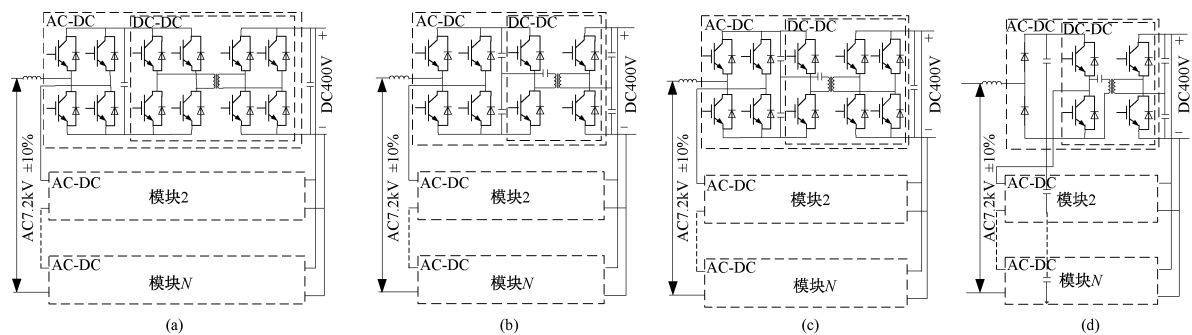


图 3 具有不同 DAB 结构的 4 种 PET 拓扑  
Fig. 3 Four PET topologies with different DAB

表 1 4 种拓扑比较结果

Tab. 1 Comparison result of four PET topologies

PET 拓扑	模块数	单模块功率/(kV·A)	器件数量			总损耗/kW	高频变压器设计要求				
			HV		LV		电压/V		漏电感/mH	体积/dm <sup>3</sup>	效率(%)
			IGBTs	Diodes	IGBTs		HV	LV			
图 3(a)	3	200	24	0	12	13.85	3700	400	2.77	36.5	99.60
图 3(b)	3	200	18	0	6	13.92	1850	200	0.693	43.6	99.57
图 3(c)	3	200	18	0	12	13.91	1850	400	0.617	41.5	99.57
图 3(d)	6	100	12	12	12	4.05	1850	200	1.39	25.6	99.77

### 3 电力电子变压器的高质量供电与源荷友好接入特性

随着研究地深入,PET 展现出高质量供电与源荷友好接入特性。

(1)电压变换和调整特性。研究 PET 的初期目的,是将其体积小、重量轻的特点应用在电压变换

中,从而节省变压器安装、运输和维修的成本。将 PET 接入电动汽车直流快速充电站<sup>[31]</sup>、电铁牵引系统<sup>[32]</sup>,取代传统变压器和电力电子变换器,可以达到减小体积和重量、提高效率的目的。此外,光伏电站<sup>[33]</sup>、风电场<sup>[5]</sup>、储能装置和潮汐电站也可以通过 PET 接入配电网。

(2)无功功率补偿和有源滤波特性。PET 接入

风电系统,可以同时实现有功功率传输、无功功率补偿和电压变换的功能<sup>[34]</sup>。文献[35]研究了基于PET的动态电压恢复器。此外,PET也可以通过调整开关频率来改变控制器的带宽,从而达到抑制谐波电流的目的<sup>[36]</sup>。当同时进行无功补偿和有源滤波时,PET可以被看作统一潮流控制器。文献[11]强调了PET无功补偿特性对平抑风电场并网点电压波动的作用。

(3)整合直流微网特性。利用PET的低压直流母线作为分布式储能装置、风力发电和光伏发电、电动汽车快速充电站等的公共母线,与直接接入交流电网相比只需要单级变换,从而实现一个结构更紧密、重量更轻、各部分之间相互协调的集成微网<sup>[37]</sup>。

(4)故障隔离和限制特性。对于电力系统的薄弱环节,PET可以实现STATCOM的功能,使系统具有暂态故障穿越的能力<sup>[34]</sup>。此外,在PET的直流端口中接入可再生能源发电和储能装置,可以在输电线发生故障时,保证功率的不间断传输,满足电网对重要负荷的优质电能供应。

考虑到PET的上述特性,基于PET接口的风力发电系统可以在实现电压等级变换和功率传输的基础上,具有提高故障穿越能力、补偿无功功率、改善电能质量等功能。

## 4 电力电子变压器在风力发电系统中的应用

PET的潜在优势使其在风力发电系统中的应用得到了国内外学者的关注<sup>[38]</sup>。

### 4.1 电力电子变压器在PMSG风力发电系统中的应用

在变速恒频的风力发电系统中,PMSG因无需齿轮箱和励磁装置、功率传输损耗小、维护费用低等特点,在风力发电系统中得到了广泛应用。PMSG风力发电系统通过工频变压器接入电网,如果考虑实现低电压穿越,可在直流环节装设卸荷电阻,其传统结构如图4所示。

为了摆脱体积庞大的工频变压器,提高功率密度,不少学者提出了新的PMSG风力发电系统拓扑结构。文献[5]提出了一种三相开关式多绕组PET应用于风力发电系统的结构,如图5所示。该系统利用高频交流环节实现功率变换,高频交流环节由两组三相一次侧绕组( $P_{a1}, P_{b1}, P_{c1}$ )、( $P_{a2}, P_{b2}, P_{c2}$ )和一组三相二次侧绕组( $S_a, S_b, S_c$ )组成的PET提

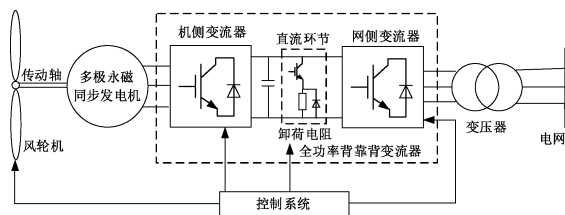


图4 PMSG风力发电系统传统结构

Fig. 4 Traditional structure of PMSG wind energy conversion system

供。PET的两组一次侧绕组与二次侧绕组反向耦合,接入三相60Hz电网,并通过以同等占空比、互斥的方式下开断 $SW_p$ 和 $SW_n$ 。在二次侧绕组中感应出高频三相电压。PET的二次侧绕组采用矩阵变换器与风机相连,实现功率因数的控制、共模电压的消除。该系统不仅能提高功率密度、省去储能电容器,还可以消除开关器件的共模电压来减小轴承电流、增加系统可靠性,但没有考虑漏电感和杂散电感的影响,而且对波动的平抑能力差,难以实现软开关。

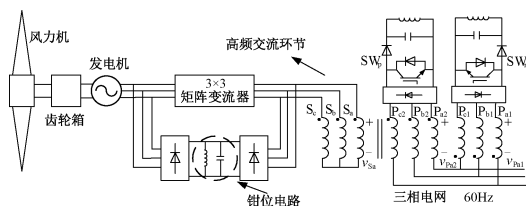


图5 基于三相开关式多绕组PET的风力发电系统

Fig. 5 Wind energy conversion system based on a three-phase, switched multi-winding PET

文献[9]和文献[39]提出一种基于电力电子变压器的永磁同步风力发电机并网系统,其结构如图6所示,在直流侧增加超级电容储能装置,使风电机组具备较强的低电压穿越能力,但是储能装置的增加导致了系统体积和成本的增加以及控制策略的复杂。文献[40]提出的结构与文献[9]所提出的结构的不同之处在于其利用卸荷电路实现风力发电系统的低电压穿越。

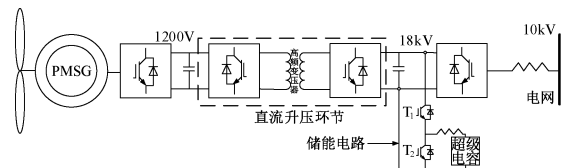


图6 基于PET的PMSG风力发电并网系统结构

Fig. 6 PMSG wind energy conversion system based on PET

文献[16]也提出了一种基于PET接口的PMSG

风力发电系统结构,如图 7 所示,与文献[9]所提出结构的不同之处在于,文献[16]的系统中不含直流侧的超级电容储能装置。文献[16]重点研究了系统各部分的数学模型和控制策略,通过建模仿真和样机实验,分析了系统在不同运行场景下的动态反应,证明了 PMSG-SST 系统的功率调节特性,但并未对故障状态下该系统的运行情况作具体分析。

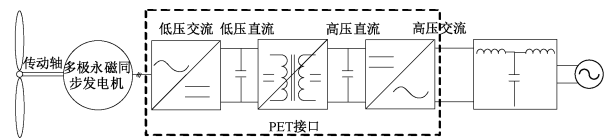


图 7 基于 PET 接口的 PMSG 风力发电系统结构  
Fig. 7 PET-interfaced PMSG wind energy conversion system

文献[41]提出了一种隔离级采用单有源桥的 PET 接入 PMSG 风力发电系统的结构,简化了系统结构和控制策略,仿真结果表明系统可以很好地应对负载变化和风速间歇性。但其分析与仿真都是建立在风力发电系统孤岛模式下,而且控制策略没有考虑最大功率跟踪。

文献[10]对文献[16]所提出的结构作了进一步改善,基于 PET 接口的 PMSG 风力发电系统的改进型结构如图 8 所示,在低压直流环节引入直流负载形成直流配电网,提出了一种改善的基于直流母线信号的分布式功率调节方案,省去了额外的通信单元,在并网模式或孤岛模式下无需多余的储能装置就可保证直流配电网的可靠性,通过仿真和实验结果证明了方案的有效性,不足的是还未对系统进行低电压穿越方面的研究分析。

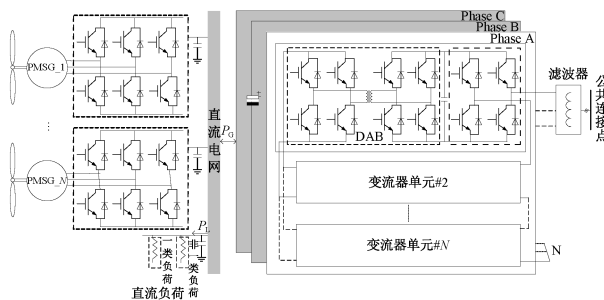


图 8 基于 PET 接口的 PMSG 风力发电系统的改进型结构  
Fig. 8 Advanced PET-interfaced PMSG wind energy conversion system

4.2 电力电子变压器在 DFIG 风力发电系统中的应用

双馈感应电机风力发电系统的传统结构如图 9 所示,通过背靠背换流器对转子实施交流励磁,定子

侧利用工频变压器直接并网。DFIG 的定子侧与转子侧可同时向电网馈送功率。DFIG 的这种结构使其具有以下优点:①能够很容易地进行有功、无功的解耦控制。②换流器容量仅占风机总容量的 25% 左右。但 DFIG 定子侧直接与电网相连,其对电网电压跌落非常敏感,工程中常采用改进的控制策略和额外的硬件电路提高 DFIG 的低电压穿越能力。

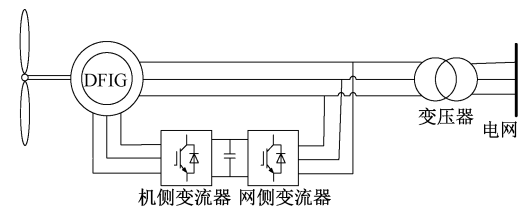


图 9 DFIG 风力发电系统传统结构  
Fig. 9 Traditional structure of DFIG wind energy conversion system

同样地,为了摆脱体积庞大的工频变压器,提高功率密度,提升低电压穿越能力,不少学者对于双馈感应电机风力发电系统也提出了新的拓扑结构。文献[11]参考文献[8]中的拓扑结构,提出了基于 PET 接口的 DFIG 风力发电系统结构,如图 10 所示,通过 MATLAB 仿真分析了风速变化时 1.5MW 的 DFIG 风机经  $1.5\text{MV}\cdot\text{A}$  的 SST 接入 5kV 配电网的运行状况,仿真结果说明所提出的结构具有传输有功功率和无功功率、补偿无功功率和减小电压波动的作用,图 11 为基于 PET 系统的公共连接点 (Point of Common Coupling, PCC) 电压与传统 DFIG 风力发电系统 PCC 电压比较结果,发现所提出的结构能更快更好地稳定并网点的电压。

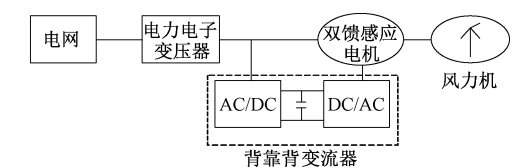


图 10 基于 PET 接口的 DFIG 风力发电系统结构  
Fig. 10 DFIG wind energy conversion system based on PET interface

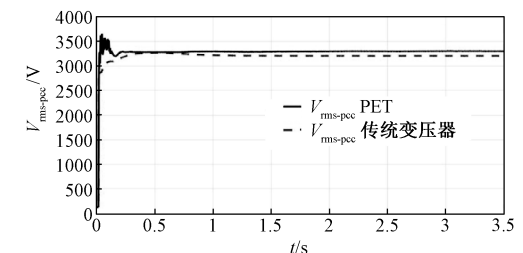


图 11 PCC 电压比较结果<sup>[11]</sup>  
Fig. 11 Comparison result of PCC voltage<sup>[11]</sup>

文献[42]基于单相 dq 矢量控制,提出电压和功率平衡控制策略来控制级联多电平 PET。文献[43]引入 SVPWM 控制技术提高电力电子变压器的运行性能,但 DFIG 机组并入电网有其特点及控制需求,上述控制方式无法满足 DFIG 的需求。文献[37]利用 PET 的故障隔离功能缓解公共耦合点电压的下降对风力发电机端电压的影响,但这仅适用于电网电压轻度跌落场合。文献[18]引入了超驰控制模块来实现系统在电网故障下的低电压穿越,通过仿真分析电网发生三相对称短路故障时系统的运行状况,与基于传统变压器的风力发电系统运行状况进行对比,发现基于 PET 的系统可以避免 DFIG 电压、电流和电磁转矩的冲击,验证了所提出的控制策略的有效性,不足之处在于没有分析系统不对称故障下的低电压穿越能力。

文献[44]提出了一种基于 PET 接口的 DFIG 风力发电系统的新型结构,如图 12 所示,该结构去除了 DFIG 的网侧换流器,PET 的整流级换流器直接与 DFIG 定子相连,DFIG 的转子侧换流器接入 PET 的低压直流母线,此外,PET 的高压直流母线并联直流斩波电路。PET 的逆变级换流器在正常运行和故障下采用不同的控制策略,框图如图 13 所示,通过监测网侧正序电压提取故障信号,控制开关  $FS_1$ - $FS_3$  的切换,保证故障情况下斩波电路的投入、无功电流注入和有功功率维持。通过比较不具有故障穿越能力的

普通 DFIG、含有直流斩波器的 DFIG 和文中提出的 DFIG 结构,在故障条件下的运行状况,证明了文中提出的 DFIG 的结构具有良好的无缝故障穿越能力。

5 结论

目前有关 PET 的系统研究主要集中在拓扑结构、控制策略和故障诊断上。对于 PET 在风力发电系统中的应用,研究工作主要集中在基于 PET 接口的风力发电系统的拓扑结构、稳态运行控制、无功功率补偿能力等方面,相关研究已取得了丰富成果,但在很多方面还需要进一步深入研究:

(1)PET 拓扑结构的选择。现有文献中多采用由级联 H 桥和两侧均为全桥的 DAB 构成的 PET 接入风力发电系统,然而与级联 H 桥比较,基于 MMC 的 PET 具有很多的优势,此外,DAB 的不同结构也有不同特点,因此,还需要进一步地研究,选择适合风力发电系统的 PET 拓扑结构。

(2)基于 PET 接口的风力发电系统的低电压穿越和高电压穿越能力。风力发电系统的低电压穿越和高电压穿越问题是一个研究热点,目前基于工频变压器接口的风力发电系统采用改进控制策略和增加额外硬件电路措施。有研究表明,可以通过设计 PET 的控制策略让风机具有低电压穿越能力,但相关研究还很少,需要从理论分析、建模仿真等方面做更多的研究。另外,基于 PET 接口的风力发电系统高电压穿越特性尚待研究。

(3)PET 容量与风机容量匹配问题。从现有的研究看,基于 PET 接口的风力发电系统的拓扑以一机一 PET 为主,尚未有研究关注 PET 容量的冗余度,PET 容量的冗余可以提高其无功补偿能力、更好地改善系统的低电压穿越问题,但是如何找到容量冗余带来的优势和导致的成本增加之间的平衡点值得研究。此外,基于 PET 接口的风力发电系统的运行状况需要更多的实验室样机实验数据进行分析。

(4)PET 自身性能的优化和效率的提升。传统变压器能成为应用最广泛的能量转换设备的根本原因是其在恶劣的环境下仍可高效、稳定、可靠地运行。对于 PET 来说,其性能的优化和效率的提升在于功率开关器件、电容、高频变压器磁芯材料等的发展,将新材料、新技术引入到 PET 的研究中具有重要的意义。此外,建立 PET 的风险评估模型,对其在不同应用场合的可靠性进行研究也是必不可少的。

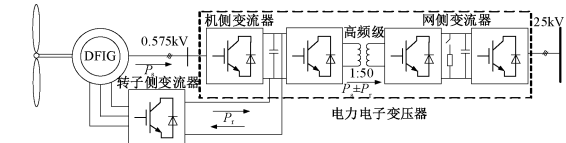


图 12 去除 GSC 的基于 PET 接口的 DFIG 风力发电系统结构

Fig. 12 DFIG wind energy conversion system based on PET interface without GSC

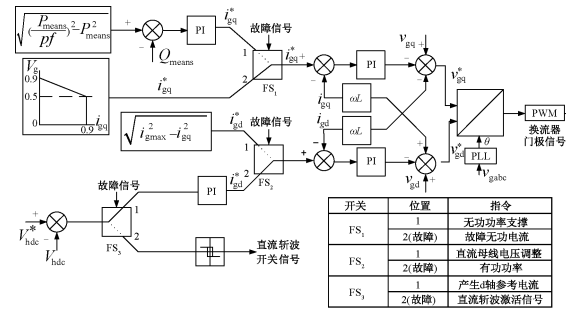


图 13 PET 逆变级换流器控制策略框图

Fig. 13 Control diagram of inverter of PET

(5) 基于 PET 接口的风力发电系统成本是其能否得到工程化应用的关键,也受到了广泛的关注,其与传统变压器之间的成本差是可以达到最小化的。基于 PET 接口的风力发电系统由整流级、隔离级和逆变级组成,传统的风力发电系统采用背靠背换流器和工频变压器,相同功率等级下,换流器模块的成本大致相同,成本差主要取决于 PET 隔离级和工频变压器,虽然 PET 隔离级会增加额外的半导体器件的成本,但是采用高频变压器会减少磁芯的尺寸,而且在传输、安装等方面也会节省成本,PET 与传统变压器之间的成本差异的研究需要关注。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Global wind report, annual market update [ R ]. Global Wind Energy Council, 2016.
- [ 2 ] Yuan X, Chai J, Li Y. A transformer-less high-power converter for large permanent magnet wind generator systems [ J ]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3 ( 3 ): 318-329.
- [ 3 ] Popat M, Wu B, Zargari N R. A novel decoupled inter-connecting method for current-source converter-based offshore wind farms [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 ( 10 ): 4224-4233.
- [ 4 ] Yuan Xibo. A set of multilevel modular medium-voltage high power converters for 10-MW wind turbines [ J ]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5 ( 2 ): 524-534.
- [ 5 ] Gupta R K, Castelino G F, Mohapatra K K, et al. A novel integrated three-phase, switched multi-winding power electronic transformer converter for wind power generation system [ A ]. 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics [ C ]. Porto, 2009. 4481-4486.
- [ 6 ] Brooks J L. Solid state transformer concept development [ J ]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1980, 81.
- [ 7 ] Harada K, Yamasaki F, Jinno K, et al. Intelligent transformer [ A ]. Power Electronics Specialists Conference [ C ]. 1996. 1337-1341.
- [ 8 ] She X, Wang F, Burgos R, et al. Solid state transformer interfaced wind energy system with integrated active power transfer, reactive power compensation and voltage conversion functions [ A ]. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition ( ECCE ) [ C ]. Raleigh, NC, 2012. 3140-3147.
- [ 9 ] 张明锐, 陈洁, 王之馨, 等 ( Zhang Mingrui, Chen Jie, Wang Zhixin, et al. ). 一种新型的永磁同步风力发电机并网系统 ( A new permanent magnet synchronous wind-power generation grid-connected system ) [ J ]. 电力系统保护与控制 ( Power System Protection and Control ), 2013, 41 ( 14 ): 141-148.
- [ 10 ] Gao R, She X, Husain I, et al. Solid-state-transformer-interfaced permanent magnet wind turbine distributed generation system with power management functions [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53 ( 4 ): 3849-3861.
- [ 11 ] Parseh N, Mohammadi M. Solid State Transformer ( SST ) interfaced Doubly Fed Induction Generator ( DFIG ) wind turbine [ A ]. 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering ( ICEE ) [ C ]. Tehran, 2017. 1084-1089.
- [ 12 ] Heinemann L, Mauthe G. The universal power electronics based distribution transformer, an unified approach [ A ]. 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference [ C ]. Vancouver, BC, Canada, 2001, 2: 504-509.
- [ 13 ] Falcones S, Mao X, Ayyanar R. Topology comparison for solid state transformer implementation [ A ]. IEEE PES General Meeting [ C ]. Providence, RI, USA, 2010. 1-8.
- [ 14 ] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等 ( Li Zixin, Gao Fanqiang, Zhao Cong, et al. ). 电力电子变压器技术研究综述 ( Research review of power electronic transformer technologies ) [ J ]. 中国电机工程学报 ( Proceedings of the CSEE ), 2018, 38 ( 5 ): 1274-1289.
- [ 15 ] Lai J S, Maitra A, Mansoor A, et al. Multilevel intelligent universal transformer for medium voltage applications [ A ]. Fortieth Ias Meeting, Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference. [ C ]. 2005, 3: 1893-1899.
- [ 16 ] 尹惠, 刘桂英, 陈冠军, 等 ( Yin Hui, Liu Guiying, Chen Guanjun, et al. ). 基于固态变压器的风电并网系统建模与控制 ( Research on modeling and control for grid-connected wind power generation system based on SST ) [ J ]. 电力科学与工程 ( Electric Power Science and Engineering ), 2014, 30 ( 9 ): 46-52.
- [ 17 ] Gao R, Husain I, Wang F, et al. Solid-state transformer interfaced PMSG wind energy conversion system [ A ]. 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition ( APEC ) [ C ]. Charlotte, NC, USA, 2015. 1310-1317.
- [ 18 ] Syed I, Khadkikar V. Replacing the grid interface transformer in wind energy conversion system with solid-state transformer [ J ]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 ( 3 ): 2152-2160.
- [ 19 ] Zhao T, Wang G, Bhattacharya S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded h-bridge converter-

- based solid-state transformer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (4): 1523-1532.
- [20] She X, Lukic S, Huang A Q, et al. Performance evaluation of solid state transformer based microgrid in FREEDM systems [A]. 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. Fort Worth, TX, USA, 2011. 182-188.
- [21] Lesnicar A, Marquardt R. An innovative modular multi-level converter topology suitable for a wide power range [A]. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings [C]. Bologna, Italy, 2003, 3: 8117364.
- [22] 王婷, 王广柱, 张勋 (Wang Ting, Wang Guangzhu, Zhang Xun). 基于模块化多电平矩阵变换器的电力电子变压器控制策略 (The control strategy of power electronic transformer based on modular multilevel matrix converters) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (18): 108-115.
- [23] Ortiz G, Leibl M G, Huber J E, et al. Design and experimental testing of a resonant DC-DC converter for solid-state transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (10): 7534-7542.
- [24] 李程, 廖勇 (Li Cheng, Liao Yong). 用于 DFIG 风电场接入电网的固态变压器控制策略 (Control strategy of solid-state transformer for DFIG-based wind farm grid integration) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2014, (6): 101-107, 120.
- [25] 张雪垠, 徐永海, 肖湘宁 (Zhang Xueyin, Xu Yonghai, Xiao Xiangning). 适用于中高压配电网的高功率密度谐振型级联 H 桥固态变压器 (A high power density resonance cascaded h-bridge solid-state transformer for medium and high voltage distribution network) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (2): 310-321.
- [26] López M, Briz F, Saeed M, et al. Comparative analysis of modular multiport power electronic transformer topologies [A]. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [C]. Milwaukee, WI, USA, 2016. 1-8.
- [27] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等 (Li Zixin, Wang Ping, Chu Zunfang, et al.). 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究 (Research on medium-and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (9): 2592-2601.
- [28] 张怀天, 荆龙, 吴学智, 等 (Zhang Huaitian, Jing Long, Wu Xuezhi, et al.). 电力电子变压器自治运行控制策略 (Control strategy for autonomous operation of power electronic transformer) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (4): 89-94.
- [29] 王优, 郑泽东, 李永东 (Wang You, Zheng Zedong, Li Yongdong). 中高压电力电子变压器拓扑与控制应用综述 (Review of topology and control application of medium and high voltage power electronic transformer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 1-10.
- [30] Montoya R J G, Mallela A, Balda J C. An evaluation of selected solid-state transformer topologies for electric distribution systems [A]. 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. Charlotte, NC, USA, 2015. 1022-1029.
- [31] 刘建华, 侯川川, 张满, 等 (Liu Jianhua, Hou Chuanchuan, Zhang Man, et al.). 基于直流固态变压器的充电站研究 (Research on charging station based on DC solid state transformer) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2016, 50 (11): 104-106.
- [32] Dujic D, Zhao C, Mester A, et al. Power electronic traction transformer: Low voltage prototype [J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2013, 28 (12): 5522-5534.
- [33] Brando G, Dannier A, Rizzo R. Power electronic application to grid connected photovoltaic systems [A]. 2009 International Conference on Clean Electrical Power [C]. 2009. 685-690.
- [34] She X, Huang A Q, Wang F, et al. Wind energy system with integrated active power transfer, reactive power compensation, and voltage conversion functions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (10): 4512-4524.
- [35] Hosseini S H, Sharifian M B B, Sabahi M, et al. Bi-directional power electronic transformer based compact dynamic voltage restorer [A]. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting [C]. 2009. 1-5.
- [36] Banaei M R, Salary E. Mitigation of current harmonics and unbalances using power electronic transformer [A]. Power Quality Conference [C]. 2010. 1.
- [37] She X, Huang A Q, Lukic S, et al. On integration of solid state transformer with zonal DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (2): 975-985.
- [38] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management System; the energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (1): 133-148.
- [39] 张明锐, 黎娜, 王之馨, 等 (Zhang Mingrui, Li Na, Wang Zhixin, et al.). 新型永磁风电系统的低电压穿越性能研究 (LVRT ability of PMSG wind power system) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automata-

tion Equipment), 2014, 34 (1): 128-134.

[40] Yan G, Zhang J, Jia Q, et al. Modeling and control of new wind power grid connected system [A]. IEEE International Conference on Energy Internet [C]. 2017. 95-100.

[41] Tom B M, Ashok S. Solid state transformer for wind power interfacing [A]. 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES) [C]. 2017. 1-6.

[42] Zhao T, Wang G, Zeng J, et al. Voltage and power balance control for a cascaded multilevel solid state transformer [A]. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. Palm Springs, CA, 2010. 761-767.

[43] 张明锐, 刘金辉, 金鑫 (Zhang Mingrui, Liu Jinhui, Jin Xin). 应用于智能微网的 SVPWM 固态变压器研究 (Research on the SVPWM solid state transformer applied in smart micro-grid) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (1): 90-97.

[44] Syed I, Khadkikar V. Replacing the grid interface transformer in wind energy conversion system with solid-state transformer [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (3): 2152-2160.

Research review of power electronic transformer applications  
in wind energy conversion systems

GUAN Jin-ping, XU Yong-hai

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Power Electronic Transformer (PET) can fulfill the function of reactive power compensation, power quality improvement, fault current limitation and so forth, with reducing magnetic materials of traditional fundamental frequency transformer. In view of its superior performance, it has been widely studied in AC and DC distribution network and energy internet. Furthermore, it is gradually attracting more attention to make PET act as the key interface between the wind turbine and the grid, replacing traditional fundamental frequency transformer. First, this paper analyzes the existing topologies of PET main circuit which are applied to wind energy conversion systems. Then, the high quality power supply and source-load friendly interfaced characteristics of the PET are summarized, which verify its practical value in wind energy conversion systems. Meanwhile, the state-of-the-art technologies of the PET interfaced PMSG and DFIG wind energy conversion systems are elaborated profoundly. Finally, some suggestions on the key problems and technical trends are also given.

**Key words:** power electronic transformer; wind energy conversion system; DFIG; PMSG