

基于储能技术提高风电机组低电压穿越能力的分析和展望

杨 堤¹,程浩忠¹,马紫峰²,方斯頓¹,徐国栋¹,管晟超¹,孙权才¹

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;

2. 上海交通大学 化学工程系,上海 200240)

摘要: 常用提高低电压穿越能力的技术中,存在控制策略法算法较复杂而且不够可靠,Crowbar 电路法电阻选取要求高、控制易失效、不能提供无功支持等问题。首先对国内外低电压穿越技术标准进行了概述,分析了当前主要低电压穿越技术研究情况;然后对储能技术的特点及其在低电压穿越技术研究中的拓扑结构、特性等进行了探讨;最后对基于储能技术的低电压穿越技术应用前景进行了分析和展望。

关键词: 低电压穿越; 储能; 风电; 超级电容器; 飞轮; 超导储能; 蓄电池; 控制

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.001

1 低电压穿越技术应用背景

截至 2013 年底,全球风电累计装机容量达到 318 GW,2013 年新增 35.46 GW,同比增长 12.5%,我国风电装机达到 91 GW,全国风电累计核准容量在建项目为 56.7 GW,占核准容量的 42%。全球风电累计装机容量前五名分别是中国、美国、德国、西班牙、印度,分别占比 28.7%、19.2%、10.8%、7.2%、6.3%。全球历年风电装机情况如图 1 所示^[1]。

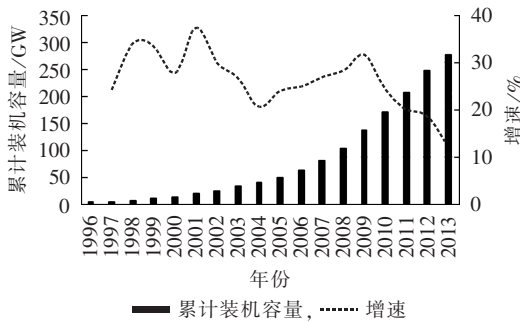


图 1 全球历年风电累计装机容量及增速

Fig.1 Global annual wind-power installed capacity and growth speed

虽然风电是一种清洁的可再生能源,但是电网故障会对风电带来冲击,严重情况下会导致风电机组脱网甚至引起电网其他机组全部解列。2011 年 2 月 24 日,酒泉风电机组大规模脱网,共计 10 座风电场 274 台风电机组脱网,致使最终脱网风机达 598 台。2011 年 4 月 17 日,甘肃干河口第二风电场故障导致 702 台风电机组脱网。2011 年 4 月 17 日,张家口华

佳鑫风电场故障致使 644 台风电机组脱网。仅 2011 年,我国 100 MW 以上风电机组发生脱网事故 193 次,其中 500 MW 以上风电机组脱网故障有 12 次^[2]。造成风机脱网事故的主要原因是风机不具备低电压穿越能力。当电网发生故障后并网点电压下降,会使风机转子侧过流直流侧过电压,严重时会使风机迫停。因此,风电场必须满足电网故障下,在电网低电压的一定时间内保证并网运行,即需要具备低电压穿越 LVRT(Low Voltage Ride Through)能力,以消除潜在的安全隐患。

低电压穿越技术是风电应用关键技术之一,已成为研究热点之一。常用的低电压穿越技术主要有控制策略法、Crowbar 电路法等。随着储能技术的发展,储能在低电压穿越方面的表现尤为突出,储能技术在风电应用中不仅具有缓冲电能、提高电能质量、改善电压稳定性等优点^[3],而且在提高低电压穿越能力方面配置灵活、性能良好,因此,储能技术在低电压穿越技术中具有广阔的应用前景。

截至 2013 年底,全球储能(除抽水蓄能、压缩空气及储热之外)总装机容量达到 736 MW,比 2012 年增长 12%。在我国,已经运行的储能装机达 51.5 MW,比 2012 年增长 39%,新增储能主要应用于可再生能源、微网以及电动汽车等方面。储能技术的大力发展,有利于其在大规模风电接入后在低电压穿越技术方面的应用。

2 低电压穿越技术标准

2.1 国外低电压穿越技术标准

2003 年,德国运营商 E. ON 首次提出了风电场并网低电压穿越技术规范。随着风电的兴起,世界各国制定了适合自身电网特点的低电压穿越技术规范,对最低电压下的并网时间以及恢复电压后并网

收稿日期:2015-03-05;修回日期:2015-09-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014-CB23903);国家自然科学基金资助项目(51337005)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB23903) and the National Natural Science Foundation of China(51337005)

时间进行了约束,世界主要国家低电压穿越中对并网和允许脱网要求如图 2 所示(图中电压为标幺值),世界主要国家或地区低电压穿越技术标准如表 1 所示^[4]。图 2 中, U_N 为风机并网点额定电压; U_{\min} 、 t_1 分别为各国低电压穿越技术标准中所规定的最小并网电压以及该情况下保持并网运行的时间; U_{restore} 通常为 0.9 p.u.,表示恢复电压值; t_2 表示并网点电压恢复到 U_{restore} 需要保持并网运行的时间。

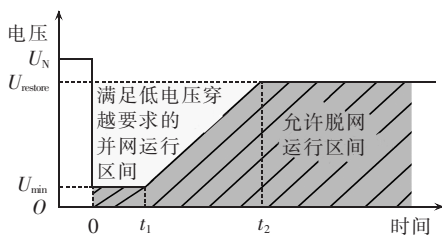


图 2 低电压穿越能力电压要求

Fig.2 Requirement of LVRT ability for voltage

表 1 世界主要国家或地区低电压穿越能力规范

Table 1 LVRT ability standard of main countries and areas

国家或地区	t_1/ms	$U_{\min}/\%$	t_2/s
德国	150	0	1.5
英国	140	0	1.2
爱尔兰	250	0	3.0
美国	625	15	3.0
加拿大 AESO	625	15	3.0
西班牙	500	20	1.0
意大利	500	20	0.8
瑞士	250	0	0.8
葡萄牙	200	0	0.7
丹麦	100	0	10.0
北欧电力联盟	625	15	3.0
新西兰	200	0	1.0

2.2 国内低电压穿越技术标准

我国在 2011 年出台的《风电场接入电力系统技术规定》关于风力发电低电压穿越技术规定^[5]:

a. 风电机组需在并网点电压跌落至 20% 的额定电压时保持 625 ms 并网运行;

b. 并网点电压跌落后需 3 s 内恢复到 90% 的额定电压,并且风电机组需保持并网运行。

3 常用低电压穿越技术

3.1 控制策略技术

良好的控制策略技术可有效提高风电机组的低电压穿越能力^[6-7],基于控制策略技术提高风电机组的基本原理为:根据风电机组的网侧变换器和转子侧变换器的控制对象建立快速有效的控制策略,通过控制电网故障后风电机组的电压、电流、无功等变量提高电压跌落后风电机组的故障恢复能力。常见的控制策略有分序控制、线性化控制、惯性能量控制、混合补偿技术等方法。

(1) 分序(正序或负序)控制。

变换器在预置电流约束下注入正序和负序有功和无功电流,使得输出电流运行在约束范围内,防止触发过流保护功能,从而提高低电压穿越能力^[4]。此外,针对不对称故障,文献[8]的研究表明在低电压穿越能力方面,负序比正序控制要有效得多,并且该低电压穿越技术也考虑到了调度需要以及变换器的控制容量。

(2) 线性化控制。

通过对发电机转速与直流电压的非线性关系线性化,使用转子侧变换器控制直流电压,使用网侧变换器控制电网最大跟踪有功,从而提高低电压穿越能力^[9]。文献[10]将电力系统模型的非线性项通过泰勒级数柯西余项推导出的不确定项表示,提出了基于二次线性化技术的网侧和转子侧变换器控制策略,既能抑制故障后的暂态扰动又能提高低电压穿越能力。

(3) 惯性能量控制。

在故障暂态期间通过转子的惯性储存能量,故障清除后再将转子中的惯性能量平滑回馈到电网,该策略可以满足低电压穿越技术要求^[11]。

(4) 混合补偿技术。

针对电网中的对称故障和非对称故障,文献[12]提出了有源补偿和无源补偿技术,有源补偿通过调整转子参考电流以减小转子过电压问题,而无源补偿利用转子电流限制器降低故障期间转子的浪涌电流,消除直流侧的过电压现象,以提高低电压穿越能力。

此外,其他控制策略对提高低电压穿越能力的研究层出不穷^[13]。基于控制策略技术提高低电压穿越能力的方法无需增加额外设备,通过修改控制策略或控制参数即能解决不同风电接入环境下的低电压穿越能力问题,但是控制策略法过于复杂,对算法可靠性要求较高,且会受到变换器容量的限制。故仅仅利用控制策略提高低电压穿越的能力有限。

3.2 辅助硬件技术

(1) Crowbar 电路技术。

Crowbar 电路技术是一种较早出现的低电压穿越技术,在故障后通过投入 Crowbar 电路抑制转子变换器的过流现象。基于 Crowbar 电路技术的低电压穿越技术的基本原理为:当风电机组转子侧电流超过预置的电流整定值时,投入 Crowbar 电路装置以短接风电机组转子绕组,切除风电机组转子侧的变换器以减小转子暂态过电流现象,当故障消除后转子侧电流减小到电流整定值以下时,切除 Crowbar 电路并恢复转子侧变换器的正常运行。Crowbar 电路主要有被动 Crowbar 技术和主动 Crowbar 技术,被动 Crowbar 技术采用晶闸管控制,而主动 Crowbar 技

术采用绝缘栅双极型晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)等全控器件控制。有效提高低电压穿越能力要求选取合适的 Crowbar 电阻,电阻大会发生过电压现象,而电阻太小又不能有效限制转子过电流。虽然 Crowbar 成本低、易实现,但依赖于故障类型,对非对称故障控制有限,在故障后的暂态过程中不能提供无功支持,运行状态切换时会发生不利于故障恢复过程中的暂态响应^[14]。典型 Crowbar 电路接入风电场的结构如图 3 所示。

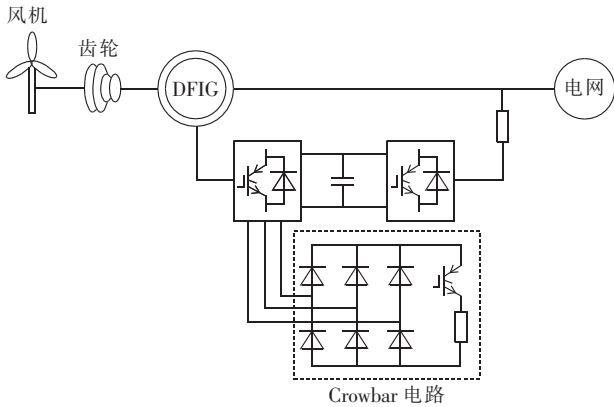


图 3 典型 Crowbar 电路接入风电场结构图
Fig.3 Structure of wind farm integration via typical Crowbar circuit

Crowbar 电路技术可以限制故障下转子侧变换器过流,该方法是提高低电压穿越能力的较为常用的方法,但是 Crowbar 电阻会消耗能量,并且可能失去对有功和无功的控制能力。当 Crowbar 在低电压情况下投入使用时,风力发电机将从电网吸收大量的无功,会进一步恶化电网的稳定和安全运行^[15-16]。针对 Crowbar 技术在故障后出现的控制失效现象,可对转子侧暂态电流线性化并前馈控制,补偿转子侧变换器交流侧输出电压,将暂态电流降到最低,从而减轻转子侧变换器的暂态电流应力,有效提高低

电压穿越能力^[17]。

(2) 动态电压恢复器技术。

动态电压恢复器 DVR(Dynamic Voltage Restorer)为电压源型变换器,DVR 接入风电场的结构如图 4 所示,通过耦合变压器串联入风电机组的并网线路中。基于 DVR 的低电压穿越技术基本原理为:通过对 DVR 采用电压控制、功率控制或阻抗控制等控制策略,改善风电机组在电网故障后的临界清除时间,增强风电机组接入电网后的低电压穿越容量。DVR 可应用于不同传输容量和电压等级的低电压穿越技术中,能抑制故障后的相角突变,补偿同步故障或异步故障后的并网线路电压以提高风电机组低电压穿越能力。

文献[21]采用临界切除时间评估低电压穿越能力,并利用 DVR 有效提高了低电压穿越能力。利用 DVR 技术可以补偿相间短路所需无功,有效提高低电压穿越能力^[22]。

(3) 统一潮流控制器技术。

统一潮流控制器 UPFC(Unified Power Flow Controller)利用自身控制的快速响应特性,采用并联方式接入风电场联络线中,解耦控制有功功率和无功功率,提高了风电机组并网点电压稳定性。基于 UPFC 技术的低电压穿越技术基本原理为:电网故障后利用 UPFC 快速独立地控制风电系统的有功和无功补偿量,通过增强系统潮流特性提高风电机组并网点电压稳定裕度,提高风电机组的低电压穿越能力。

UPFC 技术可有效防止在低电压情况下风机脱网,UPFC 通过提供无功支撑以维持并网点的电压稳定,从而提高低电压穿越能力^[23]。

(4) 定子阻尼电阻技术。

当前的低电压穿越技术主要解决的是平衡电压下降的问题,但针对故障后不平衡的电压下降问题

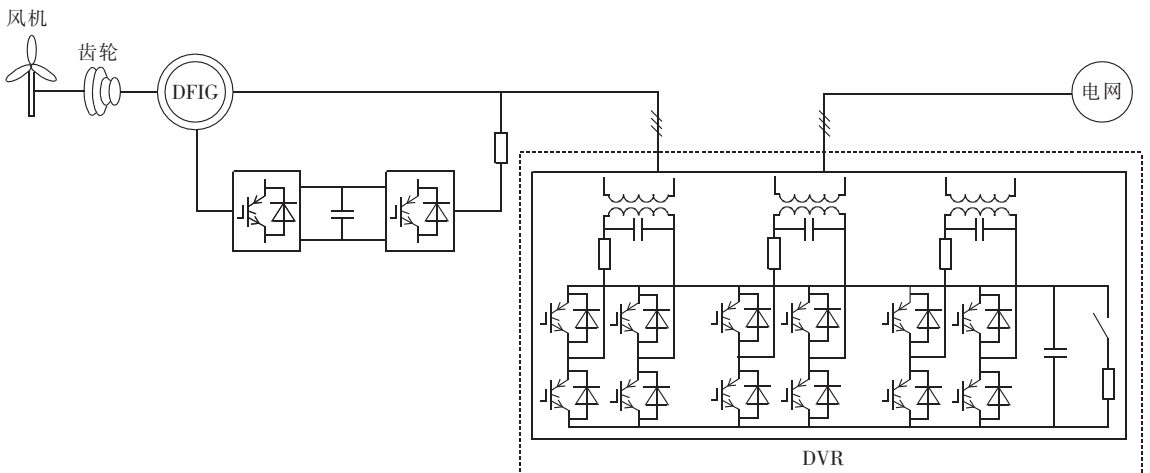


图 4 DVR 接入风电场的结构图
Fig.4 Structure of wind farm integration via DVR

效果不佳。定子阻尼电阻 SDR(Stator Damping Resistance)技术可减小故障后的风电机组转子浪涌电流及电气转矩振荡现象,能有效提高不平衡故障下的低电压穿越技术。基于 SDR 技术的低电压穿越技术基本原理为:当电网故障后风电机组发生不平衡电压跌落时,检测出电压跌落的相位并并入相应相位的定子阻尼电阻,利用 SDR 和风电机组转子侧变换器控制转子侧浪涌电流,消减转子负序电流分量,加快故障后恢复速度。SDR 装置由电阻与双向开关元件并联组成,在正常工况时开关元件闭锁,无电流流过 SDR;当电网故障电压下降后,SDR 开关元件解锁,风电机组定子电流流过 SDR 装置。SDR 接入电网的结构如图 5 所示。

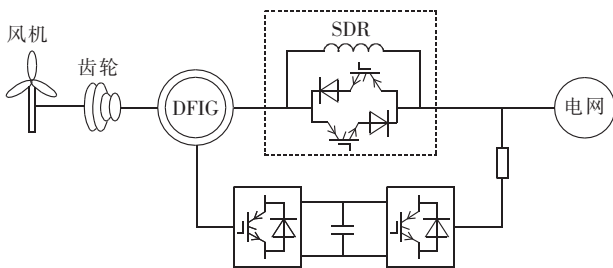


图 5 SDR 接入风电场的结构图

Fig.5 Structure of wind farm integration via SDR

基于转子侧变换器控制以及在定子绕组侧串联三相定子阻尼电阻,利用负序分量可有效改善不平衡电压暂降中的低电压穿越问题^[21]。

基于辅助硬件技术的低电压穿越技术易于实现,Crowbar 电路法虽然成本低且技术成熟,但对电阻选取要求高,且不能提供无功支持;DVR、UPFC、SDR 对控制策略要求较高,且对限制转子过电流以及直流侧过电压的能力有限。此外,基于辅助硬件技术需要额外设备,不仅带来了额外设备成本,也增加了维护成本。

3.3 动态无功补偿技术

利用动态无功补偿装置可以有效提高风电机组低电压穿越能力,如 STATCOM(Static synchronous Compensator)和 SVC(Static Var Compensator)。STATCOM 可采用两电平或三电平拓扑结构,SVC 利用晶闸管控制容抗大小,STATCOM 或 SVC 可安装于风电场并网点处调节无功。基于动态无功补偿技术的低电压穿越技术基本原理为:当电网电压跌落后风电机组从接入的电网吸收大量无功,故障消除后风电机组释放出大量无功,利用动态无功补偿装置吸收过剩无功以防止风电机组失控甚至脱网运行。利用动态无功补偿技术提高风电机组低电压穿越的实质是通过控制并网点补偿无功增加风电机组暂态稳定裕度,提高电网故障后的电压恢复能力以防止风

电机组脱网运行。

可以通过 STATCOM 和桨距控制,对风机的非线性动力特性线性化处理,建立多变量鲁棒控制器,有效提高低电压穿越能力^[22]。也可以利用 STATCOM 并对转矩特性进行简化,基于暂态稳定裕度对低电压穿越容量进行评估,以提高低电压穿越能力^[23]。

动态无功补偿技术在电网故障期间能够提供有效的无功支撑并增强故障恢复能力,并防止风电机组脱网,但是不能为变换器提供限流保护。

3.4 柔性直流输电技术

随着柔性直流输电技术的发展,由于基于电压源型的柔性直流输电技术具有对有功、频率、电压可控性好的优点,其将会大力促进未来海上风电场及偏远地区陆上风电场的大规模发展。基于柔性直流输电技术的低电压穿越技术基本原理为:利用柔性直流输电换流器的可控性能,当电网故障后换流器切换为 STATCOM 运行模式,满足风电机组的无功需求,控制并网点电压,从而有效提高直流故障穿越容量。柔性直流输电技术可对风电场接入后的有功和无功进行独立控制:(1)当电网故障后柔性直流输电可以通过控制换流器控制风电场的有功输出,能够有效消除风电机组与电网间的不匹配功率传输,减轻风电机组变换器的过流压力;(2)通过对换流器的无功控制,提高并网点的无功支持能力,维持并网点电压并加快故障后的故障恢复。因此,柔性直流输电技术在提高风电机组低电压穿越能力方面成为选择之一。

柔性直流输电技术在直流接地短路故障后,可将直流运行方式调整为 STATCOM 控制模式,为并网点提供额外的无功,增强风电系统稳定性,减少故障后的恢复时间,并提高低电压穿越能力^[24]。因此,柔性直流输电技术不仅可以消纳大规模分布式风力发电,而且还可以通过自身控制提高低电压穿越能力,故具有良好的应用前景^[25]。

但是柔性直流输电的成本较高,并且依赖于消纳风电的柔性直流输电工程的建设。

4 基于储能技术的低电压穿越技术

4.1 储能技术

当前用以提高低电压穿越技术的储能主要有飞轮储能、超导储能、蓄电池、超级电容器储能等。基于储能技术的低电压穿越技术基本原理为:利用储能装置快速去磁并衰减风电机组转子过电流,在故障暂态过程中吸收能量降低风电机组直流侧过电压,并配合网侧变换器控制无功功率,提高并网点电压稳定性,加快故障后风电机组的恢复速度,并在故障后将能量回馈给电网。

4.1.1 飞轮储能

飞轮储能利用大规模转盘惯性储能,其关键技术主要有电磁悬浮轴承、高感性材料以及电力电子技术。如图 6 所示,飞轮储能通过与电动机/发电机系统相连储存或释放能量,当在发电机模式时飞轮减速并释放电能,当在电动机模式时飞轮加速并储存电能。

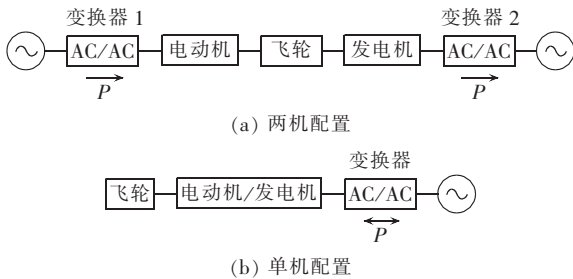


图 6 飞轮储能系统配置

Fig.6 Configuration of flywheel energy storage system

飞轮储能具有毫秒级的响应速度,当前研究主要集中在调峰或改善系统稳定性等方面。飞轮转速受制于材料、尺寸、发电机类型以及轴承类型等,其储存能量与旋转速度的二次方成正比,高速飞轮可以提供更高的能量密度^[26]。

飞轮储能技术的缺点为结构和控制复杂、成本较高,储存更高的电能需要降低电能消耗,需要解决磁悬浮轴承温度过高的关键问题,需要密度轻应力大的特殊材料。

飞轮储能提高低电压穿越的能力主要利用飞轮物理储能的特性,飞轮储能装置通过变换器接入风电机组直流侧,建立风电机组网侧变换器、转子侧变换器、飞轮接入变换器间的协调控制策略,对变换器可通过解耦控制、负序控制等方法控制风电机组直流侧的电压稳定并减小转子侧过电流,从而增强风电机组故障后的恢复能力。

飞轮储能的功率密度很高,能量密度较超导储能和超级电容器储能略高,充放电速度快,适宜未来新技术在低电压穿越技术中的应用,但是飞轮储能需要突破轴承温度适应性、材料、成本、结构的瓶颈。

4.1.2 超导储能

超导储能作为新型储能技术,利用超导线圈的电磁场储存电能,可满足暂态补偿需要。超导储能为电流源型储能装置,具有能量密度高、暂态下快速释能的特性,其能量损耗微小,转换效率高达 95%,放电时间为几十毫秒,在电力系统中可用以改善系统动静态特性等。

超导储能缺陷为需要冷却装置,这会带来不小的额外成本,并且超导对电磁环境、电流强度以及电磁场的变化极为敏感。

超导可通过变换器接入风电机组的直流侧,并通过与风电机组转子侧变换器、网侧变换器的协调控制提高电压稳定性。协调控制策略可根据风电机组及电网的特点进行设计。利用超导将直流侧电压控制在一定的范围,当直流侧电压过高时向超导充电,当直流侧电压过低时超导将能量回馈到直流侧。

超导储能的功率密度极高,很适合低电压穿越技术中对充放电快速性的要求,但由于超导目前还处于研究阶段,成本极其昂贵,因此,新材料新技术新工艺的发展进一步降低超导成本,减小超导受电磁环境的影响,将增加超导在低电压穿越技术工程应用中的可行性。

4.1.3 蓄电池储能

蓄电池主要有铅酸电池(PbO_2)、镍镉电池($NiCd$)、锂离子电池、镍氢蓄电池、钠硫电池(NaS)、氯化镍电池($Na-NiCl$)以及液流电池等。

蓄电池常可作为补偿元件与电网进行能量转换,蓄电池占地少、无污染,可安装在负荷中心附近以满足负荷侧需求。蓄电池可补偿有功和无功需求,但只有通过改变变换器的触发角才能作为无功源使用。

蓄电池储能技术在风电接入下的使用有明显弊端:充放电电流会受到限制,充电时间需要数小时,充放电次数仅有几百次,使用寿命较短,维护费较高。蓄电池在过充电或者短路下易爆炸,并且可能因为化学物质的泄漏带来环境污染,因此,蓄电池具有一定的安全隐患。

蓄电池为化学储能技术,种类繁多,特性各异,其开发已经较为成熟,并应用于不同领域。蓄电池成本低,能量密度大,适合应用于大容量储能的场合。蓄电池的缺点为充放电速度较慢,不能单独应用于提高风电机组低电压穿越技术中,但可利用其能量密度高的特点和其他储能混合应用于低电压穿越技术中。

蓄电池是应用最为广泛的储能,主要应用于混合电动汽车、海洋以及深海探测、无线网络以及电网稳定等方面。其中,具有深循环能力且效率为 70%~80%的蓄电池在电力应用中最为常见^[27]。

蓄电池在低电压穿越的应用中,主要采用和其他具有高功率密度的储能技术或 Crowbar 技术混合使用,若蓄电池与其他储能混合使用时,可将蓄电池和其他储能并联,然后通过变换器接入风电机组直流侧,通过与转子侧变换器和网侧变换器的配合,提高风电机组抵御电网故障时的脱网风险。若蓄电池和 Crowbar 配合使用时,电网故障后投入 Crowbar 装置以防止转子侧过电流,并使用蓄电池控制风电机组直流侧的电压稳定,利用蓄电池的容量大的特点

缓冲故障后风电机组的失衡功率,增加风电机组的低电压穿越容量。蓄电池在低电压穿越中主要起辅助作用。

4.1.4 超级电容器储能

超级电容器又称电化学电容器、超大容量电容器,通过电荷分离储能,容量可达几微法至数千法,电压工作范围为 2~3 V。超级电容器有高功率密度、充放电迅速、使用寿命长、环境温度适应性好(-40~85℃)、无需额外满充保护、过充电无危险、环境友好的优点。

超级电容器为电压源型储能装置,可通过控制变换器进行充放电,与超导储能、飞轮储能相比,超级电容器无需移动、控制简单,且几乎无需维护。与蓄电池相比,超级电容器的充放电次数多很多、使用寿命长、电压变化区间较宽,其能量密度比蓄电池要小,不过功率密度比蓄电池要大,超级电容器储能系统可应用在提高低电压穿越能力、改善电压稳定性、提高电能质量以及调峰等方面。

超级电容器通过双向 DC-DC 变换器与风电机组直流侧相连,超级电容器控制直流侧电压,当直流电压超过给定值时,DC-DC 变换器运行 Buck 降压模式并向超级电容器充电,以减小直流电压;反之,当直流电压低于给定值时,DC-DC 变换器切换为 Boost 升压模式,超级电容器放电以提高直流电压。超级电容器与网侧变换器协调控制,超级电容器控制直流侧电压,网侧变换器控制超级电容器的电压稳定,当超级电容器电压低于给定值时,能量经网侧变换器流向直流侧,致使直流侧电压升高,此时,DC-DC 变换器为了控制直流侧电压的升高,向超级电容器充电,反之,超级电容器通过 DC-DC 变换器向直流侧放电。

超级电容器电压在充放电过程中需控制在一定的范围,若超级电容器电压超过最大或最小工作电压时,超级电容器将停止充放电。为了风电机组直流侧电压的稳定,超级电容器的充放电电流需要保持在一定范围内。此外,控制超级电容器电压的网侧变换器控制电流需在一定区间内,以防止控制电流过大致使直流侧电压波动过大或控制电流过小致使对超级电容器的电压控制效果不佳。超级电容器较高的功率密度能保证暂态过程中的快速充放电,从而有效提高风电机组低电压穿越能力。

基于超级电容器的低电压穿越技术具有如下优点:

- 功率密度高、充放电快速、维护少、寿命长等;
- 减小电压跌落后的不平衡功率,通过能量双向流动减小故障造成的风能损失;
- 减小故障期间直流过电压。

超级电容器可与风电机组变换器协调控制风电

机组的运行,基于超级电容器的低电压穿越技术的控制方法可通过如下步骤实现:

- 当转子电流超过设定值,闭锁转子侧变换器脉冲快速去磁,快速衰减转子过电流;
- 当转子电流在衰减后较小时,可重启转子变换器;
- 若直流母线超过设定值,启动超级电容器控制直流电压的稳定;
- 在故障清除电压恢复正常后,将超级电容器吸收的能量经网侧变换器回馈电网。

基于超级电容器储能技术,可采用平滑控制策略,在故障期间吸收掉风机电能与馈入电网的电能之间的不匹配电能,平滑风机波动并提高低电压穿越能力^[28]。也可使用 STATCOM 接入超级电容器,采用解耦的 PQ 控制策略提高低电压穿越能力^[29]。文献^[30]基于 Crowbar 转子保护技术,并在并网点接入超级电容器以提高低电压穿越的能力。

4.2 储能系统接入的拓扑结构

4.2.1 DC-DC 变换器拓扑结构

基于储能技术提高风电机组低电压穿越能力中,储能系统通过变换器接入到风电系统,变换器需要具备如下特征:

- 双向能量流动,充放电可控;
- 高效率,响应速度快,能承受高峰功率;
- 占地小、重量轻。

变换器拓扑结构如图 7 所示,若储能系统需要连接到较高电压的直流母线上,则可采用图 7(a)的拓扑结构,反之,则可采用图 7(b)的拓扑结构,采用高频控制的变换器则可采用图 7(c)的拓扑结构^[26],储能系统可以根据不同的使用场合选择适当的拓扑结构。

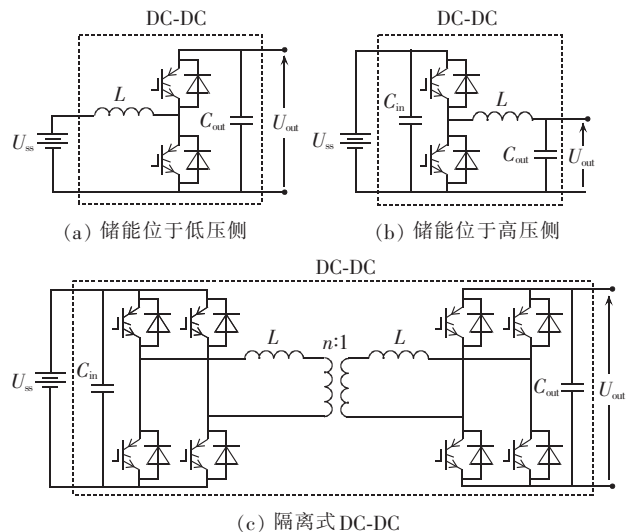


图 7 DC-DC 变换器拓扑结构

Fig.7 Topology of DC-DC converter

4.2.2 基于储能的风电场拓扑结构

储能系统提高低电压穿越的能力主要通过 2 种方式:一种是通过换流器直流侧接入,如图 8(a)所示,该方式主要通过稳定直流侧电压防止换流器触发保护动作;另一种是从公共耦合点 PCC (Point of Common Coupling)接入,如图 8(b)所示,其中复合储能系统 CESS (Composite Energy Storage System)可由蓄电池、超级电容器以及其他储能系统组成。该方式通过无功补偿维持 PCC 的电压稳定,从而防止风机脱网。超级电容器的接入方式主要根据风机类型、风电场规模以及并网情况综合考虑。

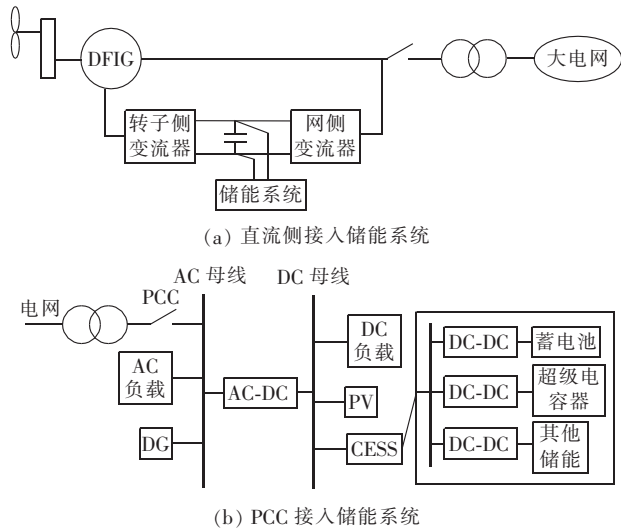


图 8 超级电容器储能系统

Fig.8 Super-capacitor energy storage system

超级电容器还可与其他储能结合使用,以提高风电接入下的储能容量及降低成本,并满足低电压穿越能力的要求。

4.2.3 基于混合储能的拓扑结构

为了满足对能量密度、功率密度、使用寿命、成本等因素的综合考虑,基于储能技术的低电压穿越技术可将多种类型的储能技术结合使用。混合储能系统的组合可有如下方式:

- a. 蓄电池与超级电容器混合储能;
- b. 蓄电池与飞轮混合储能;
- c. 蓄电池与超导混合储能。

通过适当的拓扑结构可对几种储能组合,并采用图 9 所示的拓扑结构形成混合储能系统。此外,还可通过隔离或升压变压器接入混合储能系统。混合储能的拓扑结构根据储能类型以及安全可靠要求等因素确定。

超级电容器、超导、飞轮等功率密度高但能量密度较小,而蓄电池刚好相反,通过混合储能可提高储能容量并满足低电压穿越技术的要求,储能互补可达到延长储能系统的使用寿命、提高效率、减小尺寸

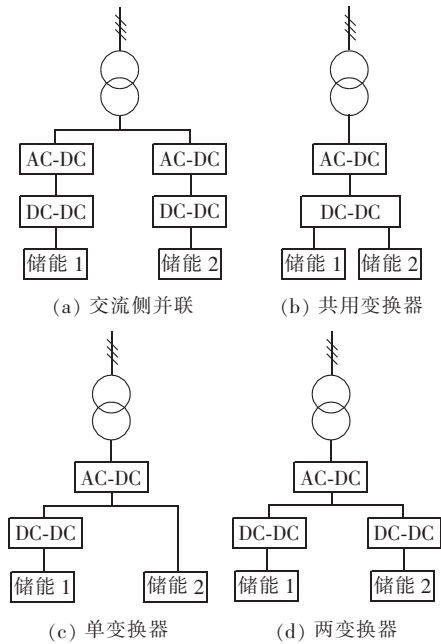


图 9 混合储能系统变换器拓扑结构

Fig.9 Topology of converter for hybrid energy storage system

以及降低成本的目的^[31-35]。

4.3 储能技术的特性

蓄电池是目前技术最为成熟、应用最为广泛的储能技术,而飞轮、超导、超级电容器等储能技术由于各自的优势而被深入研究和实验。储能系统的特性如表 2 和表 3 所示^[26],超级电容器、超导、飞轮的功率密度很高但能量密度偏低,充放电速度快,而蓄电池的能量密度较高,但功率密度较低。

表 2 常见储能系统性能表

Table 2 Specifications of common energy storage systems

类型	能量密度/ (W·h·kg ⁻¹)	功率密度/ (W·kg ⁻¹)	效率/%	寿命	
蓄电池	铅酸	20~35	25	70~80	200~2000 次
	镍化镉	40~60	140~180	60~90	500~2000 次
	镍化氢	60~80	220	50~80	<3000 次
	锂离子	100~200	360	70~85	500~2000 次
	锂聚合物	200	250~1000	70	>1200 次
	硫化钠	120	120	70	2000 次
飞轮	5~50	180~1800	95	>20000 次	
超导	1~10	100000	95	>20 a	
超级电容器	1~10	7000~18000	>95	>1000000 次	

表 3 储能系统充放电特性

Table 3 Charging/discharging performance of energy storage systems

储能系统	充电时间	放电时间
蓄电池	1~5 h	0.3~3 h
飞轮	0.5~2 h	0.5~2 h
超级电容器	1~30 s	1~30 s

蓄电池储能可用在大容量储能等场合,而飞轮、超导以及超级电容器等新型储能功率密度高,可用在抑制振荡、改善电能质量、提高电压稳定性等方面。

由于超级电容器等还具有充放电速度快的优点,尤其适合在大规模风电接入后提高低电压穿越能力的应用。

储能技术的能量成本和功率成本如表 4 所示,飞轮和超级电容器的功率成本很低,蓄电池的能量成本较低,但超导的能量成本很高,超级电容器的能量成本也偏高,因此,加大研发力度、促进储能技术革新、降低成本,是促进储能技术在风电机组低电压穿越大规模应用的重要手段。

表 4 储能技术的成本

Table 4 Costs of energy storage technologies

储能技术	能量成本/ [\$·(kW·h·a) ⁻¹]	功率成本/ [\$·(kW·a) ⁻¹]
铅酸电池	69	91
飞轮	96	1.2
超导	370000	59
超级电容器	711	6

储能技术中尤其是超级电容器储能响应快、功率密度大,能量可双向流动,作为低电压穿越的新技术,将会对大规模风电发展产生很大的促进作用。

4.4 基于储能技术的低电压穿越技术与常用低电压穿越技术对比

基于储能技术的低电压穿越技术与常用低电压穿越技术相比,主要有如下优点。

a. 成本适宜、使用寿命长。 蓄电池技术较为成熟,价格较为便宜,能量成本较低,飞轮、超导、超级电容器的功率成本较低,以超级电容器为例,其功率成本为 6 \$/(kW·a),其他储能的成本如表 4 所示。超导能量成本偏高,故其应用还依赖于超导技术的进一步提高。超级电容器的能量成本略高,但通过和蓄电池混合使用可有效降低成本。因此,储能技术具有良好的经济性。此外,飞轮、超导、超级电容器的使用寿命极高,如表 2 所示。而常用低电压穿越技术中,DVR、SDR、UPFC、STATCOM 以及柔性直流输电变电站等投资成本较高,柔性直流输电还需要较高的额外维护成本。

b. 调节速度快、低电压穿越容量易扩展。 如表 2 所示,蓄电池具有较高的能量密度,飞轮、超导、超级电容器具有较高的功率密度,储能的快速充放电性能能够很好地满足低电压穿越的要求。蓄电池、超级电容器可模块化、规模化、产业化、过载能力强、容量及功率可独立设计的特点使得基于储能的低电压穿越容量易于扩展。DVR、SDR、UPFC、STATCOM 以及柔性直流输电技术虽然响应快速,但可扩展性较差。

c. 协调控制性能良好。 储能可通过变换器接入风电机组的直流侧,利用接入变换器控制风电机组直流侧电压,并可在电网故障后与网侧变换器、转子侧变换器协调控制风电机组的并网运行。而仅仅利

用控制策略改善低电压穿越能力的方法改善效果有限,而且控制算法较复杂、可靠性不够高。Crowbar 技术会存在控制失效的可能,并且不能提供无功支撑。DVR、SDR、UPFC、动态无功补偿技术和柔性直流输电技术不能很好控制风电机组变换器转子电流及直流侧过电压。

d. 兼具大容量储能、削峰填谷等良好性能。 储能除具有提高低电压穿越的能力,还具有系统调峰、削峰填谷、平滑功率波动等功能,储能既能满足秒级别、毫秒级的快速动态响应,又能实现分钟级、小时级的储能和释能的作用。而常用的其他储能方式主要用于稳定电压、提高低电压穿越的能力,而不具有大容量储能的特点。

蓄电池成本低廉、容量大、能量密度高,但是由于功率密度较低,充放电较慢,不能单独用在低电压穿越技术中,因此,采用蓄电池与其他储能混合的方法可综合提高风电机组低电压穿越能力。

飞轮储能、超导储能均具有很高的功率密度,很适合用于提高风电机组低电压穿越能力,目前还在实验验证阶段。

超级电容器功率密度高、充放电迅速,超级电容器的功率成本很低,能量成本还偏高,由于超级电容器的应用领域较广阔,技术逐渐成熟化,成本的进一步降低将会大力推进其在风电机组低电压穿越中的应用。

5 基于储能技术提高低电压穿越能力的展望

储能技术在提高低电压穿越能力上具有广阔的应用前景,基于储能技术的低电压穿越技术在未来的研究和应用中需要重点关注以下几点。

(1) 需要解决储能关键技术难点问题。当前的低电压穿越技术主要有 Crowbar 技术和控制策略法,基于蓄电池和超级电容器的技术已成为低电压穿越技术的热点之一,而其他储能方式下的低电压穿越技术的研究目前较少见。超导储能需要重点解决冷却和对电磁环境敏感的问题,飞轮储能需要突破磁悬浮轴承温度过高的难点并发展质轻应力大的材料,锂离子、液流电池等是大容量蓄电池储能的发展方向。随着各种储能技术的发展和成本的不断降低,储能作为低电压穿越技术的新技术势必会成为最佳选择之一。

(2) 确定应用于低电压穿越技术的储能种类和容量。根据风电机组的接入规模、位置及电网的强健程度确定储能类型,并可充分利用某些地理优势,发挥储能低成本大容量(如蓄电池等)以及高功率密度的优点(如超级电容器、飞轮等)。根据低电压穿越技术标准,计算低电压穿越技术需要的储能容量。

(3) 确定储能在低电压穿越技术中的配置方案以及辅助功能的协调控制。根据风电分布以及机组类别(如双馈风机类型等)确定储能系统的接入方式和组合配置方案,对混合储能系统需要研究协调控制策略。混合储能可由蓄电池和超级电容器组成或其他多种储能组合,在低电压穿越技术应用中混合储能需要满足储能容量大、能量密度高、功率密度高的特点。此外,需要研究基于储能技术的低电压穿越能力与电能质量、电能管理等辅助功能的协调控制方法。

(4) 研究多种储能技术互备用的可行性。在柔性直流输电消纳风电的场合,可将基于柔性直流输电的低电压穿越技术与基于储能技术的低电压穿越技术形成互备用,储能技术也可与 Crowbar 技术、控制策略等低电压穿越技术形成互备用,以提高低电压穿越能力的安全可靠性。

(5) 精确建模和快速检测能力。对储能系统精确建模,对变换器的过流、直流侧过电压等提供快速准确的检测手段,确保满足对称故障和非对称故障下低电压穿越能力的要求。

(6) 促进大规模储能在低电压穿越中的推广应用。未来对超级电容器储能、飞轮储能、超导储能规模化应用的瓶颈需要得到解决。当前基于储能提高低电压穿越能力的技术还在研究和实验阶段,需要破解大规模应用的关键难点。加大对超级电容器、超导储能、飞轮储能等新型储能的研究,进一步提高能量密度和降低成本,使得储能新技术在提高低电压穿越能力方面成熟化和实用化。储能需要达到标准化和批量化生产的能力,并且需要具备安全可靠、高效经济的特点。新技术要满足低电压穿越技术的要求,以促进储能技术在大规模风电接入下的应用。

6 结论

当前低电压穿越技术中,控制策略法较复杂且可靠性不够;Crowbar 电路法对电阻选取要求高,而且依赖故障条件,不能提供无功支撑能力;DVR、UPFC、SDR 技术提高低电压穿越的能力有限;动态无功补偿、柔性直流输电可为电网提供无功支撑并加快故障后的电压恢复。但是,这类低电压穿越技术不能很好地解决故障后的有功功率失衡问题以及对风电机组变换器的保护问题。

由于储能类型众多、效率高、响应速度快、能量可双向流动、占地小重量轻,蓄电池等储能容量大并且廉价,超级电容器、超导、飞轮等储能功率密度高、充放电迅速,储能技术配置灵活,通过若干储能组合可有效提高风电机组低电压穿越的能力。基于储能技术的低电压穿越技术与其他低电压穿越技术相

比,高效可靠,成本适中,不仅可以提高低电压穿越能力,而且还可以发挥调峰、抑制振荡、改善电能质量、提高电压稳定性等多方面的作用。因此,随着储能技术的发展,基于储能技术的低电压穿越技术具有良好的应用前景,尤其是超级电容器具有高功率密度且调节速度快,维护较少,受地理环境等因素的制约较小,可和其他储能混合使用以提高低电压穿越能力,还可带来其他附加效益(如调峰效益)。

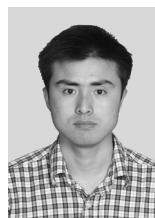
基于储能技术的低电压穿越技术的发展,必然会有效促进大规模风电接入的应用。

参考文献:

- [1] STEVE S, KLAUS R. Global wind report annual market update 2013[R]. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council(GWEC), 2014.
- [2] 电监会办公厅. 关于近期三起大规模脱网事故的通报[EB/OL]. (2011-05-06)[2014-12-22]. http://www.gov.cn/gzdt/2011-05/06/content_1859103.htm.
- [3] 谢应昭, 卢继平. 含风储混合系统的机组组合优化模型及求解[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 18-27.
XIE Yingzhao, LU Jiping. Multi-objective unit commitment optimization model including hybrid wind-storage system and its solution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 18-27.
- [4] CHIA T L, CHE W H, PO T C. A low voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1821-1832.
- [5] 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [6] 章心因, 胡敏强, 吴在军. 基于 VSC-HVDC 的风力发电系统低电压穿越协调控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 138-144.
ZHANG Xinyin, HU Minqiang, WU Zaijun. Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 138-144.
- [7] 张明锐, 黎娜, 王之馨. 新型永磁风电系统的低电压穿越性能研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 128-135.
ZHANG Mingrui, LI Na, WANG Zhixin. LVRT ability of PMSC wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 128-135.
- [8] WAQAR A Q, NIRMAL C K N. Systematic development of Low Voltage Ride-Through(LVRT) envelope for grids[C]//IEEE Region 10 Conference. Fukuoka, Japan: IEEE, 2010: 574-579.
- [9] GENG Hua, LIU Cong, YANG Geng. LVRT capability of DFIG-based WECS under asymmetrical grid fault condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2495-2511.
- [10] HOSSAIN M J, SAHA T K, MITHULANANTHAN N. Control strategies for augmenting LVRT capability of DFIGs in inter-connected power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2510-2523.
- [11] XIE Dongliang, XU Zhao, YANG Lihui. A comprehensive LVRT control strategy for DFIG wind turbines with enhanced reactive power support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3302-3401.

- [12] MOHAMMADI J,AFSHARNIA S S V Z. Efficient fault-ride-through control strategy of DFIG-based wind turbines during the grid faults[J]. Energy Conversion and Management,2014, 78:88-95.
- [13] CHOU S F,LEE C T,KO H C. A low-voltage ride-through method with transformer flux compensation capability of renewable power grid-side converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(4):1710-1719.
- [14] 徐殿国,王伟,陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):29-37.
XU Dianguo,WANG Wei,CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of double-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22):29-37.
- [15] KAYIKÇI M,MILANOVIĆ J V. Assessing transient response of DFIG-based wind plants—the influence of model simplifications and parameters[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008, 23(2):545-554.
- [16] YANG J,FLETCHER J E,REILLY J O. A series-dynamic-resistor based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(2):422-432.
- [17] LIANG Jiaqi,QIAO Wei,HARLEY R G. Feed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010,25(3):836-844.
- [18] AMUTHA N,KALYAN B K. Improving fault ride-through capability of wind generation system using DVR[J]. Electrical Power and Energy Systems,2013,46:326-333.
- [19] CHRISTIAN W,FABIAN G,FRIEDRICH W F. Dynamic voltage restorer to allow LVRT for a DFIG wind turbine[C]//2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Bari, Italy:IEEE,2010:803-808.
- [20] ALHARBI Y M,YUNUS A M S,SIADA A A. Application of UPFC to improve the LVRT capability of wind turbine generator[C]//Universities Power Engineering Conference. Bali, Wikipedia:IEEE,2012:1-4.
- [21] MOHSEN R,MOSTAFA P. Low voltage ride-through capability improvement of DFIG-based wind turbines under unbalanced voltage dips[J]. Electrical Power and Energy Systems,2014,60: 82-95.
- [22] HOSSAIN M J,POTA H R,UGRINOVSKII V A. Simultaneous STATCOM and pitch angle control for improved LVRT capability of fixed-speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2010,1(3):142-152.
- [23] MARTA M,JON A S U. Low voltage ride through of wind farms with cage generators:STATCOM versus SVC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(3):1104-1118.
- [24] RALPH F,EWAN F,ALAN J W. DC fault ride-through capability and STATCOM operation of a HVDC hybrid voltage source converter[J]. IET Generation,Transmission & Distribution, 2014,8(1):114-120.
- [25] 李生虎,安锐,许志峰. 混合风电场中 PMSG 协助感应发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):21-28.
LI Shenghu,AN Rui,XU Zhifeng. Coordinated LVRT of IG and PMSG in hybrid wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):21-28.
- [26] SERGIO V,SRDJAN M L,EDUARDO G. Energy storage systems for transport and grid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(12):3881-3896.
- [27] MOHAMMED Y S,MOHDWAZIR M,NOURUDEEN B. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,35:499-514.
- [28] PYROS I G,CHARIS S D. A combined fault ride-through and power smoothing control method for full-converter wind turbines employing supercapacitor energy storage system[J]. Electric Power Systems Research,2014,106:62-72.
- [29] RAHIM A H M A,NOWICKI E P. Supercapacitor energy storage system for fault ride-through of a DFIG wind generation system[J]. Energy Conversion and Management,2012,59:96-102.
- [30] WANG Limeng,WANG Shiqing,LI Guoqing. Improving LVRT capability of doubly fed induction generator utilizing super-capacitor with rotor crowbar protection[C]//IET International Conference on Information Science and Control Engineering 2012. Shenzhen,China:IET,2012:1-5.
- [31] TOSHIFUMIISE M K,AKIRA T. A hybrid energy storage with a smes and secondary battery[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2005,15(2):1915-1919.
- [32] 任永峰,彭伟,刘海涛,等. 基于钒电池-超级电容混合储能技术的永磁同步风电机组低电压穿越能力提升研究[J]. 电网技术, 2014,38(11):3016-3023.
REN Yongfeng,PENG Wei,LIU Haitao,et al. Enhancement of low voltage ride through ability of permanent magnet synchronous wind power generation sets based on hybrid energy storage system composed of vanadium redox battery and super capacitor[J]. Power System Technology,2014,38(11):3016-3023.
- [33] ARJAN M V V,LAURA M R E,GERARD C P. The application of super capacitors to relieve battery-storage systems in autonomous renewable energy systems[C]//2007 IEEE Lausanne Power Tech. Lausanne,Switzerland:IEEE,2007:290-296.
- [34] WEE K W,CHOI S S,VILATHGAMUWA D M. Design of a least-cost battery-supercapacitor energy storage system for realizing dispatchable wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2013,4(3):786-797.
- [35] HU Xiaolei,TSENG K J S. Optimization of battery energy storage system with super-capacitor for renewable energy applications[C]//2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. Jeju,Korea:IEEE,2011:1552-1557.

作者简介:



杨堤

杨堤(1983—),男,陕西汉中,博士研究生,研究方向为电力系统电压稳定与控制技术(E-mail:yangti@sju.edu.cn);

程浩忠(1962—),男,浙江东阳,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统电压稳定、规划、电能质量等;

马紫峰(1963—),男,浙江东阳,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为燃料电池、锂离子电池和超级电容器等。

(下转第 20 页 continued on page 20)

Damping characteristics and countermeasure of DFIG sub-synchronous oscillation

GAO Benfeng¹, LI Ren¹, YANG Daye², SONG Ruihua², ZHAO Shuqiang¹, LIU Jin³, ZHANG Xuewei¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Beijing Economic and Technological Research Institute of State Grid, Beijing 102209, China)

Abstract: SSCI (Sub-Synchronous Control Interaction), a new type of sub-synchronous oscillation, may be induced by the interaction between the rotor side converter and the compensating capacitor of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) when large-scale wind power is transferred through the transmission lines with fixed series compensation. The working principle of DFIG converter and its output characteristics are analyzed and its equivalent simulation model based on the controlled voltage source at AC side and the controlled current source at DC side is built, which avoids the impact of high-order harmonics of switching devices on the calculative results of DFIG electrical damping to enhance the simulation efficiency. Based on the equivalent model, the complex torque coefficient method is adopted in time-domain to calculate the electrical damping characteristics of DFIG within the range of sub-synchronous frequency for analyzing the impacts of wind-speed, converter PI parameters, compensation-degree and transmission line resistance on the electrical damping characteristics. The analytical results show that, the negative electrical damping of DFIG increases along with the wind-speed decrease, inner-loop gain increase, integral time-constant decrease, compensation-degree increase and transmission line resistance decrease; the impact of outer-loop PI parameters on the damping characteristics of DFIG is not large. An additional H-SSDC (Hybrid Sub-Synchronous Damping Controller) in the rotor side converter of DFIG is proposed to restrain SSCI and its effectiveness is verified by the simulation results.

Key words: doubly-fed induction generator; sub-synchronous control interaction; models; complex torque coefficient method; hybrid sub-synchronous damping controller; wind power; damping

(上接第 10 页 continued from page 10)

Analysis and prospect of LVRT improvement based on energy storage technology for wind turbine generator system

YANG Di¹, CHENG Haozhong¹, MA Zifeng², FANG Sidun¹, XU Guodong¹,
GUAN Shengchao¹, SUN Quancai¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Chemical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Among the common technologies for improving the LVRT (Low Voltage Ride Through) ability, the control strategy method is complex and unreliable, while the Crowbar circuit method suffers for the difficult resistance selection, control failure and impossible reactive-power support. The LVRT technology standards at home and abroad are summarized and the current research status of main LVRT technologies is analyzed. The characteristics of energy storage technology, as well as its topology and features in the applications of LVRT technology, are discussed. The development trend of LVRT technology based on energy storage technology is analyzed and prospected.

Key words: LVRT; energy storage; wind power; super capacitor; flywheel; superconductive magnetic energy storage; electric batteries; control