

永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述

冯子木¹, 孙国强¹, 滕德红¹, 李群², 刘建坤², 赵静波²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:风电的大规模发展使越来越多的永磁直驱风电机组接入电网,影响电网安全稳定运行,其中风电机组的低电压穿越(LVRT)问题是风电并网安全性方面的首要问题。文中首先基于传统风电场和其他新能源发电场 LVRT 策略的研究成果,结合永磁直驱风电机组特点,综述较为主流的适用于永磁直驱风电场的 LVRT 技术手段,为永磁直驱机型为主的风电场提供相应策略。然后,分析各个方法的应用场景与工作机理,比较不同方法的优势与不足,并针对不同方法的应用前景提出相应建议。最后,总结未来 LVRT 技术的发展方向,并指出当前风电场大规模并网仍需解决的经济技术难题,为进一步提升大规模风电安全消纳水平指明方向。

关键词:低电压穿越(LVRT);永磁直驱风电机组;无功补偿;储能;协调控制

中图分类号:TM614;TM761

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0075-11

0 引言

在风力发电发展的早期阶段,受制于硬件与技术条件,陆上风电场一直是投资建设的主流方向。然而,陆上风能波动性大、陆上风电场占陆地面积大、单机容量受限等问题越来越制约其发展。相较之下,海上风电具有资源丰富、风力稳定、发电利用小时数高、不占用陆地资源、单机容量易扩展等优点,符合当前单机大容量的发展趋势^[1]。悬浮式海上平台的出现以及海上远距离电能传输解决方案的提出^[2-6],为远海风电的发展提供了思路^[7-8]。因此,海上风电场装机容量开始呈现稳步增长的趋势^[9]。中国东南沿海的负荷集中地区,有着丰富的海上风能资源^[10-13],在未来发展海上风电是解决其用电需求的重要手段。

永磁直驱同步发电机(directly-driven permanent magnet synchronous generator, D-PMSG)相较于双馈与半直驱发电机,无需齿轮箱等机组部件,有效降低了故障率,具有更高的可靠性,且综合成本较低。未来大规模风电场将以 D-PMSG 作为主要机型。为了保障电力系统的安全性与可靠性,低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)是风电上网必须达到的技术指标^[14]。传统策略使风电场在并网电压跌落时主动脱网,保障设备安全。但大装机容量的风电场主动脱网势必会导致电网系统内部潮流大幅转移,触发稳控系统动作,造成电力系统解列运行、大范围停电等严重后果^[15-16]。

收稿日期:2020-09-27;修回日期:2020-10-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904500)

虽然风电并网的 LVRT 问题研究较多,但大多集中于双馈风机^[17]。D-PMSG 与双馈风机在结构上存在差异^[18],故二者的 LVRT 策略也存在差异。文中根据 D-PMSG 运行及其 LVRT 期间的特点,从已有 LVRT 策略中筛选出适用于 D-PMSG 机组的技术手段进行综述,评价、比较其优缺点。并对 LVRT 策略进行分类,总结其共性与差异,展望未来的研究方向及工程应用前景。

1 LVRT 要求

传统的 D-PMSG 控制策略通过机侧换流器跟踪功率指令实现最大风能跟踪,通过网侧换流器实现直流侧电压稳定调节和单位功率因数控制^[19-21]。

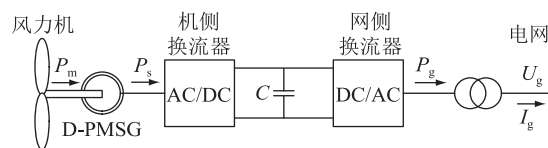


图1 D-PMSG 结构

Fig.1 The structure of D-PMSG

图1中,风力机捕获的风能转化为机械功率 P_m ;D-PMSG 输出的电磁功率为 P_s ;经机、网侧换流器变换,通过直流线路向电网送出的有功功率为 P_g ^[22-23]。稳态时,若忽略损耗,有 $P_m = P_s = P_g$ 。当电网故障引起电网电压 U_g 跌落时,电网侧的功率振荡及换流器自身的限流措施等会引起电网电流 I_g 变化,导致 D-PMSG 网侧换流器输出功率 P_g 不稳定^[19]。由于全功率换流器的隔离作用,在电网电压跌落过程中, P_s 几乎不变。此时 $P_m = P_s \neq P_g$,直流侧功率无法平衡,并联电容 C 上的直流电压抬升并

剧烈波动,影响系统稳定运行,情况严重时会导致风电场主动脱网^[24]。

电力相关部门对风电场 LVRT 提出了明确要求。风电机组在并网点电压跌落的一定范围内,必须在保证自身系统安全运行的前提下不脱网运行,并应能够向电网提供无功功率,帮助电网恢复电压^[25-26]。风电场 LVRT 要求如图 2 所示,并网电压跌落至额定值的 20% 时,风电机组不脱网连续运行 625 ms。在电压跌落 2 s 内,若并网电压能恢复到额定电压的 90%,风电场内的风电机组应能够保持不脱网运行^[27-28]。当风电场并网点的电压在图 2 中电压曲线上时,电网要求风电场机组能够不间断并网运行。当风电场并网点的电压在图 2 中电压曲线下方时,风电场的机组允许从电网切出^[29-30]。

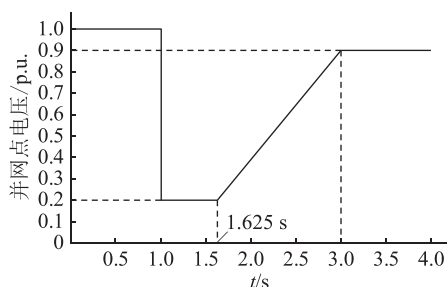


图 2 风电场 LVRT 要求

Fig.2 LVRT requirement of wind farm

目前一些风力发电发达国家已经制定了新的并网导则,定量规定了风电场的脱网条件。只有当电网电压跌落至低于相应的新规曲线时才允许脱网,并且风电场必须具备向电网提供无功功率的能力^[31-32]。现有提升 LVRT 能力的手段可分为:在风电场送出的直流侧加装硬件保护电路;在并网电压调节设备;在风电场加装储能设备;通过改进的协调控制策略实现 LVRT。

2 直流侧加装硬件保护电路

加装硬件保护电路是最常见的提升风电场 LVRT 能力的技术手段,其代表是撬棒(Crowbar)电路。Crowbar 电路通过在线路中构建额外通路消纳不平衡功率,其应用范围涵盖所有涉及功率不平衡问题的场合。因此,在 D-PMSG 全功率换流器内,或者风电场的直流送出侧,可通过加装 Crowbar 电路提升风电场的 LVRT 能力。

2.1 常见 Crowbar 电路及应用

Crowbar 电路通常通过斩波(Chopper)电路的形式实现。文献[33]从应用性和经济性方面,对 Chopper 电路集中安装在并网电压交流侧或直流侧的

技术方案进行了对比。与 AC Chopper 方案相比,DC Chopper 方案具有盈余功率与耗能精准匹配、系统波动小、恢复时间短、设备投资少、设备尺寸小、稳态损耗小等优点。装设在风电场侧的 AC Chopper 和直流线路上的 DC Chopper 接入示意如图 3 所示。若接入 AC Chopper,其端口直接接入风电场侧换流器的出口交流母线;若接入 DC Chopper,其 2 个端口并联接入换流器间的直流线路。

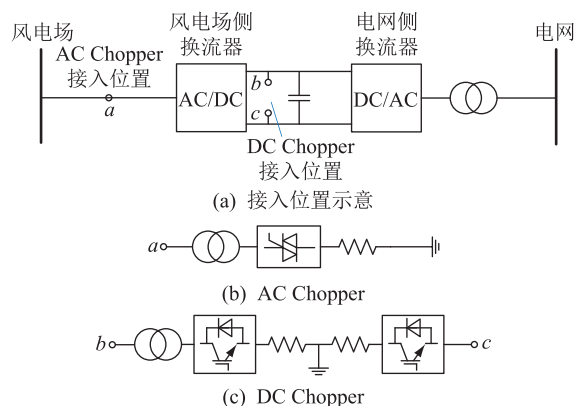


图 3 AC Chopper 和 DC Chopper 接入位置示意

Fig.3 Schematic diagram of AC Chopper and DC Chopper insert locations

Crowbar 电路通过增加额外的有功能量释放回路,减小注入到直流母线的不平衡能量,避免直流母线过电压。但在消耗不平衡能量的同时,切入的 Crowbar 硬件保护电路也屏蔽了换流器控制系统对直流电压的控制以及直流两侧间的联系,导致机侧换流器无法有效控制风电场侧的输出功率,降低了风电机组运行稳定性。若故障时间较长,易出现 Crowbar 电路频繁投切问题,直流电压往复振荡,有功功率在系统和换流器间来回流动,不利于系统恢复。Crowbar 电路的主要器件是耗能电阻,故障期间多余的能量以热能形式直接耗散,能量利用效率低,且对器件热稳定性要求高。

为获得更佳的性能,有研究尝试对 Crowbar 电路结构进行改进。文献[34]为缓解感性元件的瞬态过电压,提出 2 种改进思路。一是将 Chopper 电路替换为半桥型电路,实现电路的软开关;二是在换流器的每个子模块上安装制动电阻,实现灵活控制。前者的控制策略较为复杂,后者则不适用于已封装完成的子模块。

2.2 小结

Crowbar 电路是最常规的 LVRT 技术,是换流器与风电场设备的保护装置。受限于 Crowbar 电路的作用机理,其无法作为电源对系统运行施加主动影响。未来的主要研究方向是 Crowbar 的开关策略和

阻值设计对电力系统恢复特性的影响及其与其他控制策略配合的可能性^[35-36]。

3 并网点加装电压调节设备

加装硬件保护电路的方式是在风电场侧增加设备解决 LVRT 问题,而在电网侧加装附属设备提升风电场 LVRT 能力的思路是将电网侧的电压大幅跌落变为风机送出端电压的小幅跌落,进而降低对风电场侧 LVRT 能力的要求。可采用的附属设备主要包括动态无功补偿设备、动态电压调节器(dynamic voltage regulator, DVR)以及串联动态制动电阻(series dynamic braking resistor, SDBR)。

3.1 应用动态无功补偿装置

动态无功补偿装置主要指静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)等响应快速的无功补偿设备^[37]。SVC 和 STATCOM 可以在不同程度上提高风电场的暂态稳定裕度^[38-39],并从两方面辅助风电场实现 LVRT。一是在电压跌落时快速注入无功电流,支撑并网点电压;二是对于不平衡故障,将不平衡跌落转化为易于处理的三相平衡跌落。

通用 SVC 的接入示意如图 4 所示。风电场中常采用的 SVC 设备是晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR),其通过控制晶闸管的触发角度^[40],调节并网点的并联阻抗大小,在 0 到满发范围内调节并网点无功电流。

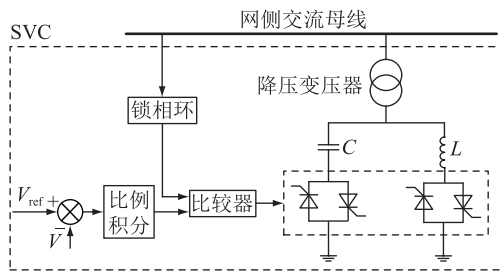


图 4 SVC 接入示意

Fig.4 Schematic diagram of SVC accessed

STATCOM 的接入示意如图 5 所示。相比于 SVC, STATCOM 响应速度快,能够承受更长的暂态过程,且补偿的无功电流大小不受电压跌落的影响^[37]。由于 STATCOM 是基于电压源换流器,其可通过更精确的解耦控制实现更多的控制方式组合^[41]。

采用动态无功补偿装置的缺点是,装置切入的瞬间会向电网注入较大的电流以满足电压恢复过程中所需的能量,而瞬间的大电流会对电力系统造

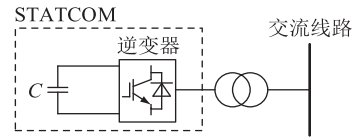


图 5 STATCOM 接入示意

Fig.5 Schematic diagram of STATCOM accessed

成冲击,影响电力系统的稳定性。

3.2 串联 DVR

DVR 相当于串联在电网中的动态受控电压源,对其采用适当控制,可使输出电压抵消电力系统扰动对负荷电压造成的不良影响^[42-43]。

与切入 STATCOM 需要瞬时注入大电流相比, DVR 的优势在于只需注入较少的能量即可满足电网电压跌落时的 LVRT 要求。DVR 的 WINDFACT 技术较为典型^[44],如图 6 所示。DVR 投入时,开关 1 开断。在正常运行状态,开关 2 均闭合,模块 3 处于导通状态,所有低压侧电力电子元件均处于热备用状态。当并网点电压跌落时,模块 3 进入开断模式,低压侧受控设备接入系统,并在并网点产生额外电压,辅助风电场重建并网点电压。当 DVR 不投入系统时,开关 1 闭合。当风电场需要被切出系统时,开关 1 与开关 2 均开断。

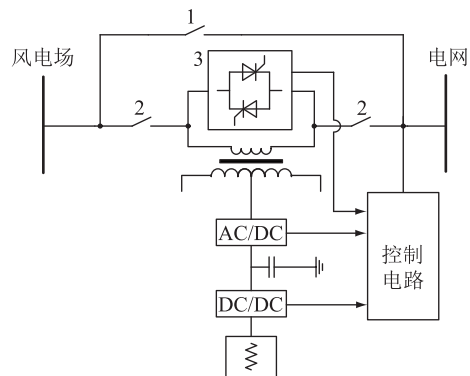


图 6 DVR 的 WINDFACT 技术

Fig.6 WINDFACT technology of DVR

3.3 应用 SDBR

文献[45-46]通过安装 SDBR 使风电场在电网故障时尽量维持功率送出, SDBR 接入示意如图 7 所示^[47-48]。SDBR 的工作原理是:在电网故障时,通过将电阻元件接入电网,增加机端到接地点的过渡电阻,缓解机端的电压跌落,并通过电阻耗能形式消纳多余有功功率。文献[49]在此基础上提出了灵活串联制动电阻(flexible series braking resistors, FSBR), FSBR 结构如图 8 所示。相较于传统 SDBR, FSBR 增加了机端电压与 LVRT 过程的可控性。文献[50]将电阻换成了电容器,在电网出口处采用电容器串联补偿的方法,缓解作用到风电场上

的电压降落。相较于电阻,电容的优势是损耗小、电压抬升效果明显,但弊端是可能引起过电压,且会影响线路保护动作。

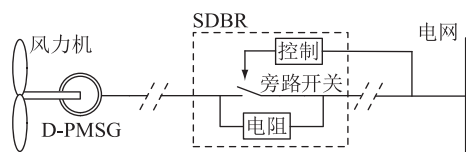


图7 SDBR 接入示意

Fig.7 Schematic diagram of SDBR accessed

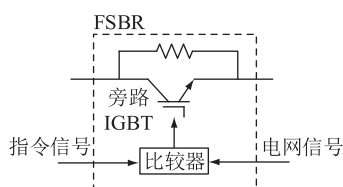


图8 FSBR 结构

Fig.8 Structure of FSBR

3.4 小结

电压调节装置可在系统发生故障时缓解并网点的电压跌落幅度,通过保证风电场侧的功率输送能力使风电场实现 LVRT。其缺陷在于,基于无功补偿和电压调节手段无法从根本上解决功率不平衡问题。在近并网点故障严重时,依然无法支撑电压。今后,功能更全面、占地面积更小的设备以及更加灵活的接入与控制策略将成为主要的研究方向。

4 风电场加装储能设备

在风电场侧或电网侧加装设备可以改善电压跌落,但不能很好地应对 LVRT 过程中的功率不平衡问题。随着储能技术的发展,有研究提出使用充放电迅速、损耗低的新一代储能设备替代耗能电阻吸收不平衡功率,再通过适当的方式将能量回送电网,实现 LVRT 的同时将损耗降至最低。

4.1 超导储能

文献[51]提出应用超导储能系统(superconducting magnetic energy storage, SMES)解决风电场 LVRT 过程中的直流母线过电压问题。SMES 是近代新生的储能系统,具有存储能量密度高以及无损耗的优良特性^[52]。相较于传统直流保护系统,SMES 可以大电流充放电,具备优良的可控性与高效的稳压能力,可在故障时实现电能的快速消纳。SMES 接入示意如图 9 所示。在故障排除后,网侧换流器可根据 SMES 的储能状态与并网点的电压情况,判断是否执行恢复策略。恢复过程中,网侧换流器以 SMES 的标准状态为基准,控制向电网输出

的有功量,进而改变直流母线电压。为了稳定直流电压,SMES 会进入相应的充放电状态。当 SMES 的状态回归正常水平后,网侧换流器转回正常运行控制策略。全恢复流程如图 10 所示^[53]。

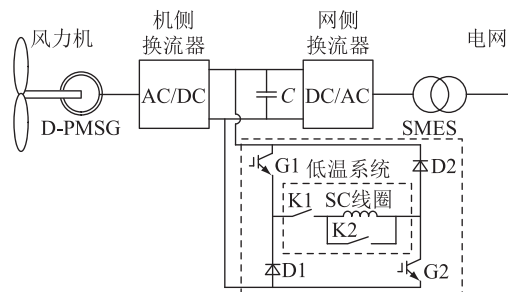


图9 SMES 接入示意

Fig.9 Schematic diagram of SMES accessed

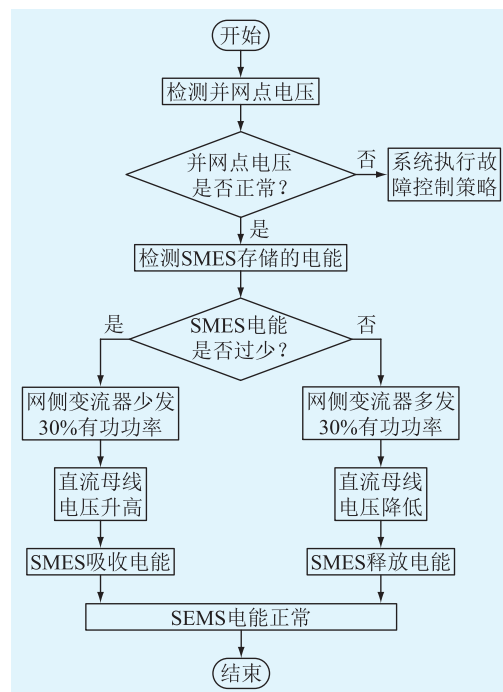


图10 基于网侧换流器的 SMES 电能平衡策略

Fig.10 The balance strategy of SMES power based on grid side converter

4.2 超级电容

基于超级电容储能(supercapacitor energy storage system, SCESS)的 LVRT 将 Crowbar 中的电阻器件替换成 SCESS,避免器件发热的同时,提高了系统的 LVRT 能力^[54]。SCESS 接入系统示意如图 11 所示。由于目前超导条件要求高,SMES 设备的投入和运营维护成本高。SCESS 在降低储能环境要求的同时,具备响应速度快、可循环使用次数多和功率密度高的优点,因此当前 SCESS 应用于 D-PMSG 风电场的可行性更高。当 LVRT 结束后,可与网侧换流器的功率指令配合,将 SCESS 中的能量释放给电网,使整个系统回到初始状态^[55]。

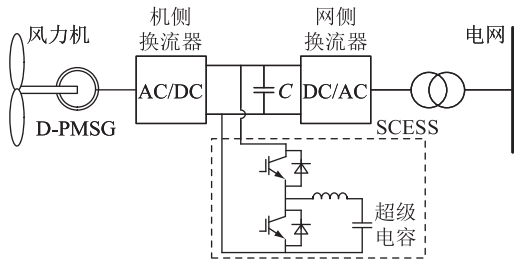


图 11 SCESS 接入示意

Fig.11 Schematic diagram of SCESS accessed

4.3 小结

储能技术不仅是解决 LVRT 的重要策略,也是解决新能源消纳问题的重要手段。在利用新一代储能设备解决 LVRT 的同时,也应当利用其控制和调节层面的延展性,主动对系统施加有利影响。比如通过配合适当的控制策略,在系统正常运行时使风电场具备参与调频的能力^[56]。当前该方向的技术难题除了设备制造安装维护外,还有在海上这类特殊应用场合下储能状态的维持问题,今后可考虑利用海上悬浮波浪发电等就地发电装置解决^[57]。

5 改进型控制策略

上述通过加装硬件设备解决 LVRT 问题的方法均会增加实际制造、运行和维护成本。因此有研究尝试通过改进既有设备的运行控制模式,直接或间接解决功率不平衡问题或实现与外部设备类似的功能。由于控制方式设计灵活、种类繁多,文中仅从控制对象上对该类方法进行总结。

5.1 变桨距角控制

变桨距角的控制逻辑如图 12 所示。 P_e 为风力机实际发出的电磁功率; $P_{e,ord}$ 为系统电磁功率的指令值; θ_{max} 为最大可调节桨距角; θ_{ord} 为桨距角控制指令。在检测到并网电压跌落、有功送出能力下降时,可通过改变桨距角减小风力机的风能捕获量,从而减小 D-PMSG 出力,缓解直流线路过电压。文献[58]采用了一种独立桨距角控制模式,在传统桨距角控制的基础上提高了调度灵活性,同时避免了个别执行器故障影响系统整体可靠性。

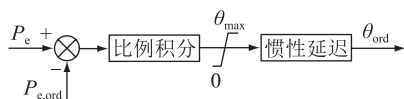


图 12 追踪功率指令的桨距角控制逻辑

Fig.12 The pitch angle control logic following the power order

然而变桨距角控制存在固有缺陷,从发现故障

到变桨距角开始调节存在响应时间。变桨距角调节是通过风机上的专用电机实现,与电力系统的故障响应不在同一时间尺度,调节功率速度慢,无法达到快速响应要求,因此该方法通常只作为辅助控制手段。在应对非瞬时性故障,需要对输出功率做长期调节时,该方法效果较好^[59-60]。

5.2 机侧与网侧换流器控制方式调整

有研究提出可改变机、网侧换流器的控制模式,充分发挥全功率换流器作用,提升风电场的 LVRT 能力^[61-62]。该策略采用与传统方式相反的控制模式,通过机侧换流器控制直流母线电压,通过网侧换流器实现最大风功率追踪^[63-65]。该方案下机侧换流器的控制策略如图 13 所示。比较直流侧电压 U_{dc} 与其参考值 $U_{dc,ref}$ 、交流侧电压 U_{ac} 与其参考值 $U_{ac,ref}$ 后,经比例积分环节得到电流 dq 轴分量的指令值。经有功优先限流控制后,电流指令值与实际电流 dq 分量 I_d, I_q 作比较,经比例积分调节后输出电压 dq 轴指令值 $V_{d,ord}, V_{q,ord}$ 到机侧换流器。

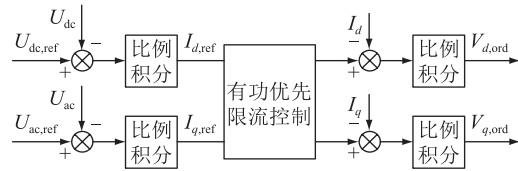


图 13 机侧电压控制策略

Fig.13 Control scheme of machine side voltage

该方案下网侧换流器的控制策略如图 14 所示,分为有功优先控制模式和无功优先控制模式。

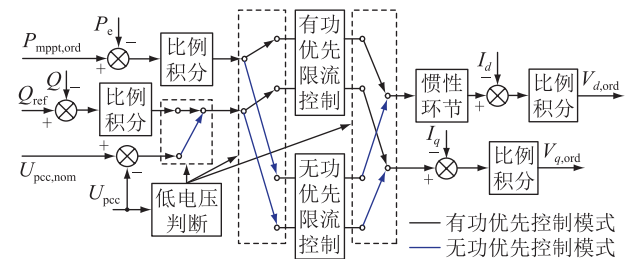


图 14 网侧功率控制策略

Fig.14 Control scheme of grid side power

图 14 中, $P_{mppt,ord}$ 为风机采用最大功率跟踪策略的电磁功率指令值; Q_{ref} 为根据需要自定的无功功率指令; Q 为实发无功功率值; $U_{pcc,nom}$ 为正常运行时并网点的电压; U_{pcc} 为实际并网点的电压,用于低电压判断; I_d, I_q 为实际电流的 dq 轴分量; $V_{d,ord}, V_{q,ord}$ 为输出到换流器的电压指令。正常运行时采用有功优先控制模式,限流策略优先限制无功电流,保证有功功率的有效追踪。在电网电压发生跌落时,网侧换流器将被调整运行在无功优先状态,机侧不平衡功率对直流母线充电,使直流母线电压升高。检测

到电压升高后,机侧换流器及时调节发电机电磁转矩,降低电磁功率输出^[66-67],保证直流侧的功率平衡与电压稳定。此时发电机输出电磁功率将小于风力机的机械功率,发电机的转速增加,即不平衡能量转化为转子机械能^[68]。当并网点电压恢复后,可通过适当的控制策略释放过剩的转子动能,使转子转速恢复到正常水平。

采用转子储能存在弊端,当电压跌落程度较深或持续时间较长时,发电机转子转速上升,可能超出安全运行范围。当发电机转子转速临界时,风电机组将无法继续对有功输出进行主动调节。若在正常运行中用机侧换流器平衡直流电压,风速波动可能直接导致直流电压不稳定。因此仅建议在故障状态下进行控制策略切换。

文献[69]提出在 LVRT 期间,使网侧换流器运行在 STATCOM 模式,实现与加装无功补偿设备相似的功能。文献[70—71]提出利用虚拟同步机技术控制常态下的风电场机、网侧换流器的运行,在并网点发生电压跌落时,通过模拟系统惯性实现 LVRT。文献[72]提出保持电网侧换流器控制策略不变,通过风电场侧换流器实现风电场电网侧升频和直流侧电压降低,进而快速降低外送的电磁功率,实现 LVRT。

也有研究提出,机、网侧换流器可与其他控制方法协调配合,通过适当的顶层控制策略获得更好的效果。文献[73]以模糊控制策略作为顶层策略,实现风机侧换流器与储能装置的协调控制,利用储能装置快速吸收不平衡功率,同时在可控范围内减小机侧换流器输出的电磁功率。文献[74]提出将换流器控制、转子储能控制以及 Crowbar 电路相联合的 LVRT 模式,由网侧换流器提供无功支撑网侧电压,由转子侧惯性储能和 Crowbar 电路消纳不平衡功率。

5.3 小结

改变控制策略的 LVRT 技术无需增加设备,只需改变既有设备运行模式,因此具有较大的设备成本优势。但由于没有实体设备支撑,其能应对的情况有限,响应特性受系统影响较大。将控制策略叠加虽可收获良效,但增加了控制层复杂度,易影响执行效率,降低了系统的可靠性。

6 方案比较与应用

在实际应用中,一方面,目前 D-PMSG 主要应用在海上风电场,其 LVRT 策略需满足复杂度低、可靠性高的要求;另一方面,今后采用级联直流升压方

式的全直流风电场将会逐渐增多^[75-78],风电场内的直流线路占比大幅增加。因此应优先考虑可直接作用在直流侧的 LVRT 策略。各方案的优缺点如表 1 所示。

表 1 LVRT 策略比较
Table 1 The comparison of LVRT schemes

方案	优点	缺点
加装可控耗能设备	原理简单;可在复杂条件下稳定运行;成本较低	存在设备发热与能源浪费问题;无法主动影响系统运行特性
加装电压调节设备	可安装在电网侧;无需远程作业	成本较高,需要专门维护;控制方法需根据系统专门设计;未从根本原因入手解决问题
改进换流器控制方法	无需额外硬件设备	响应特性受系统对象特性和执行方式影响;未从根本上解决问题
加装储能设备	改善电能的时空分布特性;不浪费能源;在正常运行时也可改善新能源的消纳特性	设备一次投入成本高;当前技术并不成熟

总体来看,解决 LVRT 问题宜采用硬件策略为主、控制策略为辅的方式,并以能够快速消纳不平衡功率作为基本要求。具体如下:

(1) 可控耗能设备应作为保护方案使用。在安装可控耗能设备的基础上,可再配置改进型换流器应对较小的电压跌落。

(2) 加装电压调节设备的目的应是服务电网为主,服务风电场为辅。完全针对风电场配置的电压调节设备性价比低、局限性大,在未来将会逐渐减少。

(3) 在底层有硬件支撑的前提下,改进的换流器控制方法可作为一般 LVRT 问题的主策略。应在保证良好效果的同时,尽可能简化控制层。

(4) 储能技术是未来解决 LVRT 问题的主要手段。储能设备不仅可以与硬件设备配合,还可以通过控制层实现灵活调度。在成本允许的前提下,宜优先采用储能技术解决 LVRT 问题。

7 结语

未来 D-PMSG 的 LVRT 策略应做到调节与保护能力并重,在做到应急响应的时候,也能改善系统运行特性。收效良好的 LVRT 策略不只是多种方法的简单杂糅,而应具备规范的技术体系。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“基于可控移相器(TCPST)的柔性交流潮流运行控制技术研究”(J2019135)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] LIU Y, RAO G H, SHAO R B. Research on offshore wind farms

- transmitted via VSC HVDC of an Integrated supervision and control system [C]//2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS). Dalian, China. IEEE, 2020; 633-636.
- [2] 郑明, 李保宏, 陆莹, 等. 海上风电场集群输电网可靠性分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 49-54.
ZHENG Ming, LI Baohong, LU Ying, et al. Reliability analysis of offshore wind farm transmission network cluster[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 49-54.
- [3] DAKIC J, CHEAH-MANE M, GOMIS-BELLMUNTO, et al. HVAC transmission system for offshore wind power plants including mid-cable reactive power compensation; optimal design and comparison to VSC-HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020(99): 1-9.
- [4] 王秀丽, 张小亮, 宁联辉, 等. 分频输电在海上风电并网应用中的前景和挑战[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 15-19.
WANG Xiuli, ZHANG Xiaoliang, NING Lianhui, et al. Application prospects and challenges of fractional frequency transmission system in offshore wind power integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 15-19.
- [5] PATHAK N, HUZ C. Optimal power transmission in multi-terminal HVDC systems for large offshore wind farms; a matheuristic approach[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(12): 2245-2254.
- [6] 曹帅, 向往, 鲁晓军, 等. 风电经混合型 MMC 外送的暂态能量转移机理与限流耗散策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 121-129.
CAO Shuai, XIANG Wang, LU Xiaojun, et al. Transient energy transfer mechanism and current limiting dissipation strategy in wind power delivery via hybrid modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 121-129.
- [7] WUZ Y, LI Y Y. Platform stabilization of floating offshore wind turbines by artificial muscle based active mooring line force control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(6): 2765-2776.
- [8] HU Yinlong, WANG Jianning, WANG Zhaoyan, et al. Structural control for a barge-type floating offshore wind turbine with a skyhook inerter configuration [C]//2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). 2020.
- [9] Global Wind Energy Council. GWEC global wind stats-tics 2017[R]. Brussels: GWEC, 2018.
- [10] FENGY C, QUE L J, FENG J M. Spatiotemporal characteristics of wind energy resources from 1960 to 2016 over China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2020, 13(2): 136-145.
- [11] 孙稚权, 项杰, 管玉平. 基于 ERA-interim 资料中国近海风能资源时空分布[J]. 海洋预报, 2016, 33(3): 50-56.
SUN Zhiquan, XIANG Jie, GUAN Yuping. Wind energy in the offshore areas of China based on ERA-interim reanalysis data[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(3): 50-56.
- [12] 刘霖蔚, 宋军. 中国海上风能资源分布与风电机组选型探讨[C]//2014 中国环境科学学会学术年会论文集. 成都, 2014; 343-347.
- LIU Linwei, SONG Jun. Discussion on the distribution of offshore wind energy resources in China and the selection of wind turbines [C]//Chinese Society For Environmental Science. 2014 Annual Meeting of Chinese society of Environmental Sciences. Chengdu, 2014; 343-347.
- [13] 汤辰. 直驱永磁风电系统低电压穿越技术的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2018.
TANG Chen. Research on low voltage ride through technology in direct drive permanent magnet wind power system [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2018.
- [14] JIANGZ M, LIU Y T. Low-voltage ride-through remote testing method for offshore wind turbines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 2905-2913.
- [15] 巩真. 基于反馈线性化的永磁直驱风电机组低电压穿越控制[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(12): 74-81.
GONG Zhen. Low voltage ride through control of permanent magnet synchronous generator wind power systems based on feedback linearization[J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(12): 74-81.
- [16] IBRAHIM A O, NGUYEN T H, LEE D C, et al. A fault ride-through technique of DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 871-882.
- [17] 孙云鹏, 谢冬梅. 双馈风力发电机低电压穿越技术综述[J]. 中国设备工程, 2017(15): 152-153.
SUN Yunpeng, XIE Dongmei. An overview of low voltage ride through technology for DFIG wind turbine systems[J]. China Plant Engineering, 2017(15): 152-153.
- [18] MOGHADAM F K, NEJAD A R. Evaluation of PMSG-based drivetrain technologies for 10 MW floating offshore wind turbines; pros and cons in a life cycle perspective[J]. Wind Energy, 2020, 23(7): 1542-1563.
- [19] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.
LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [20] 任亚钊. 永磁直驱风力发电系统低电压穿越控制技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
REN Yazhao. Research on control technologies of low voltage ride through for direct-drive permanent magnet wind power system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [21] 周奕鑫, 王孝洪, 田联房. 双 PWM 永磁同步风力发电控制器设计[J]. 电气传动, 2014, 44(7): 24-29.
ZHOU Yixin, WANG Xiaohong, TIAN Lianfang. Design on the-controller of dual-PWM PMSG wind turbine systems[J]. Electric Drive, 2014, 44(7): 24-29.
- [22] 张祥宇. 变速风电机组的虚拟惯性与系统阻尼控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

- ZHANG Xiangyu. Virtual inertia and system damping control for variable speed wind turbines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [23] 王瑞新. 笼型异步变速恒频风力发电系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- WANG Ruixin. Research on VSCF wind power system of squirrel cage induction generator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [24] 董淑惠, 王毅. 永磁直驱风力发电机组两种主要功率控制策略的对比研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(4): 73-80.
- DONG Shuhui, WANG Yi. Comparative analysis on two main power control strategies of PMSG-based wind turbines[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(4): 73-80.
- [25] 杜宝星, 刘观起, 杨玉新. 电网电压跌落时双馈风电系统无功支持策略[J]. 电气技术, 2012(12): 1-4.
- DU Baoxing, LIU Guanqi, YANG Yuxin. Reactive power support strategy for wind power system based on DFIG during grid voltage dips[J]. Electrical Engineering, 2012(12): 1-4.
- [26] 易韵岚. 一种适合低电压穿越的直驱式永磁风力机组控制策略[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- YI Yunlan. An control strategy of direct-drive permanent-magnet wind power system for low voltage ride through [D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [27] 亓振新. 面向风电的固定电压跌落装置监控系统研究与开发[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- QI Zhenxin. Research on the fixed voltage sag monitoring system for wind power[D]. Ji'nan: Shandong University, 2013.
- [28] 王莉莉. 基于 RTDS 的源网协调联合仿真接口模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- WANG Lili. Research on interface model of source and grid coordinate joint simulation based on RTDS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [29] 赖联琨, 胡浩. 双馈风力发电机组低电压穿越关键技术研究[J]. 华北电力技术, 2011(9): 26-31.
- LAI Liankun, HU Hao. Low voltage ride-through of doubly-fed induction generator system[J]. North China Electric Power, 2011(9): 26-31.
- [30] 向昌明, 范立新, 蒋一泉, 等. 风电场内风电机组连锁脱网机理与低电压穿越能力研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 91-97.
- XIANG Changming, FAN Lixin, JIANG Yiquan, et al. Analysis of cascading trip-off mechanism and low voltage ride through capability of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 91-97.
- [31] 耿华, 刘淳, 张兴, 等. 新能源并网发电系统的低电压穿越[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- GENG Hua, LIU Chun, ZHANG Xing, et al. Low voltage ride through of new energy grid-connected power generation system [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [32] 王冬冬. 兆瓦级双馈风电机组低电压穿越控制技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- WANG Dongdong. Research on the control technology of MW doubly fed wind generators low voltage ride through[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [33] 王国英, 贾一凡, 邓娜, 等. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越方案[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 146-154.
- WANG Guoying, JIA Yifan, DENG Na, et al. Grid side fault ride through solution for offshore wind connection with VSC-HVDC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 146-154.
- [34] WANG Mian, HU Yaowei, ZHAO Wenjian, et al. Application of modular multilevel converter in medium voltage high power permanent magnet synchronous generator wind energy conversion systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(6): 824-833.
- [35] QUY B, GAO L, MA G F, et al. Crowbar resistance value-switching scheme conjoint analysis based on statistical sampling for LVRT of DFIG[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 558-567.
- [36] DIN Z, ZHANG J Z, ZHU Y D, et al. Impact of grid impedance on LVRT performance of DFIG system with rotor crowbar technology[J]. IEEE Access, 2019, 7: 127999-128008.
- [37] 李明东. 风电场实现低电压穿越技术改造方案[J]. 中国电力, 2011, 44(6): 48-51.
- LI Mingdong. Reform plan of wind farm low voltage ride-through technology[J]. Electric Power, 2011, 44(6): 48-51.
- [38] 付伟, 刘天琪, 李兴源, 等. 静止无功补偿器运行特性分析和控制方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 147-154.
- FU Wei, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static var compensator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 147-154.
- [39] 徐江. STATCOM 用于改善风电场并网点电压质量的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- XU Jiang. Research of improvement on wind farm integration point voltage quality by using STATCOM [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [40] 雷邦军, 费树岷, 翟军勇, 等. 静止无功补偿器(SVC)的一种新型非线性鲁棒自适应控制设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(30): 65-70, 11.
- LEI Bangjun, FEI Shumin, ZHAI Junyong, et al. A novel improved nonlinear robust adaptive control design method of SVC [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(30): 65-70, 11.
- [41] REZAEIAN-MARJANI S, GALVANI S, TALAVAT V, et al. Optimal allocation of D-STATCOM in distribution networks including correlated renewable energy sources[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122: 106178.
- [42] 张智勇. 动态电压恢复器的应用研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2008.
- ZHANG Zhiyong. Study on application of dynamic voltage restorer[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2008.

- [43] 王德发. 电能质量调节器相关技术研究及 APF 模拟装置实现[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
WANG Defa. Studys of the correlative technology of power quality conditioner and development of APF experimental prototype[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2007.
- [44] VISIERS M, MENDOZA J, BUNEZ J, et al. WINDFACT ©, a solution for the grid code compliance of the windfarms in operation[C]//European Conference on Power Electronics & Applications. IEEE,2007.
- [45] CAUSEBROOK A, ATKINSON D J, JACK A G. Fault-ride-through of large wind farms using series dynamic braking resistors(March 2007)[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007,22(3):966-975.
- [46] 余佩芸. 串联动态制动电阻的双馈风力发电系统低电压穿越技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
YU Peiyun. Reaserch on low voltage ride through of doubly-fed wind power generation system using SDBR[D]. Chongqing: Chongqing University,2018.
- [47] 王虹富. 并网风电场的有功功率补偿与稳定性控制[D]. 杭州:浙江大学,2010.
WANG Hongfu. Active power compensation and stability control for grid-connected wind farms[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2010.
- [48] 郭杨,徐青山,李岩岩,等. 双馈异步风力发电系统电网故障穿越能力研究[J]. 电力科学与工程,2011,27(7):1-6,40.
GUO Yang, XU Qingshan, LI Yanyan, et al. Research on capability of grid fault riding through in doubly-fed asynchronous wind power generation system[J]. Electric Power Science and Engineering,2011,27(7):1-6,40.
- [49] 党克,郑玉浩,杨富磊,等. 利用串联制动电阻提高光伏并网系统故障穿越能力的研究[J]. 太阳能学报,2017,38(2):302-308.
DANG Ke, ZHENG Yuhao, YANG Fulei, et al. Study of improving fault ride-through ability of grid-connected pv generation system using series braking resistor[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2017,38(2):302-308.
- [50] PENGXIN, WANGWEI. A new LVRT method applied on the integration of distributed wind power generation [C]//2012 China International Conference on Electricity Distribution. Shanghai, China. IEEE,2012;1-4.
- [51] 吴俊玲,吴畏,周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电工电能新技术,2004,23(3):59-63.
WU Junling, WU Wei, ZHOU Shuangxi. Study on SMES unit for improving the stability of power system connected with wind farms[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2004,23(3):59-63.
- [52] 魏蔚. 多螺管线圈型超导储能磁体漏磁场的研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
WEI Wei. Study on the leakage field by multi-coil type superconducting magnet [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University,2015.
- [53] 边相阳,袁帅,孟令剑,等. SMES 提高 DFIG 低电压穿越能力策略研究[J]. 吉林电力,2019,47(6):27-31,56.
BIAN Xiangyang, YUAN Shuai, MENG Lingjian, et al. Operational research on SMES for improving DFIG low voltage ride through capability[J]. Jilin Electric Power,2019,47(6):27-31,56.
- [54] 刘诗涵. 直驱永磁海上风电系统低电压穿越能力研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
LIU Shihan. The research on low voltage ride through of direct drive permanent magnet offshore wind power system [D]. Changsha:Changsha University of Science & Technology,2017.
- [55] 王鹏,王晗,张建文,等. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计及应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1528-1537.
WANG Peng, WANG Han, ZHANG Jianwen, et al. Design and application of supercapacitor energy storage system used in low voltage ride through of wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(10):1528-1537.
- [56] TROVATO V, CONENNA D, DICORATO M, et al. The economic and financial benefits for wind turbines providing frequency response exploiting the kinetic energy or operating part-loaded [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2020.
- [57] RAMIREZ D, BLANCO M, ZAREI M E, et al. Robust control of a floating OWC WEC under open-switch fault condition in one or in both VSCs [J]. IET Renewable Power Generation, 2020,14(13):2538-2549.
- [58] BADIHI H, ZHANGY M, PILLAY P, et al. Fault-tolerant individual pitch control for load mitigation in wind turbines with actuator faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,68(1):532-543.
- [59] YANG X P Y, DUAN X F, TIAN F F, et al. Low voltage ride-through of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[C]//Asia-Pacific Power & Energy Engineering Conference. IEEE,2009.
- [60] 李建林,徐少华. 直接驱动型风力发电系统低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):29-33.
LI Jianlin, XU Shaohua. Control strategy of low-voltage ride-through for direct-drive wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):29-33.
- [61] KIM K H, JEUNG Y C, LEE D C, et al. LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(5):2376-2384.
- [62] 刘忠义,刘崇茹,李庚银. 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的功率协调控制方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):23-29.
LIU Zhongyi, LIU Chongru, LI Gengyin. Coordinated power control method for improving low voltage ride through capability of wind turbines with permanent magnet synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39

- (3):23-29.
- [63] 韩金刚,陈昆明,汤天浩. 半直驱永磁同步风力发电系统建模与电流解耦控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):110-115.
HAN Jingang, CHEN Kunming, TANG Tianhao. A research on modeling of half-direct coupling wind power system and decoupling current control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10):110-115.
- [64] 姚兴佳,马永兴,郭庆鼎. 直驱风力发电系统双PWM变流器控制技术[J]. 电源学报,2011,9(5):74-78.
YAO Xingjia, MA Yongxing, GUO Qingding. Research on double PWM converter control technology in direct drive wind power system[J]. Journal of Power Supply, 2011, 9(5):74-78.
- [65] 郑翔宇,沈渭程,李诚,等. 直驱风机低电压穿越控制技术研究及实测验证[J]. 中国电力,2013,46(11):100-104.
ZHENG Xiangyu, SHEN Weicheng, LI Cheng, et al. Research and verification of LVRT control techniques for direct-drive wind turbines[J]. Electric Power, 2013, 46(11):100-104.
- [66] 卢沁雄,韩如成,张媛,等. 永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电源技术,2015,39(11):2489-2492,2530.
LU Qinxiong, HAN Rucheng, ZHANG Yuan, et al. Control strategy for low voltage ride-through of direct-drive permanent magnet wind power generator[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(11):2489-2492,2530.
- [67] 张佳军. 风光储微电网多电源协调控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
ZHANG Jiajun. Research on coordinated control strategies of micro-sources for wind/PV/battery micro-grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [68] 崔立悦,高桂革,曾宪文. 直驱式永磁同步风机低电压穿越的控制策略研究[J]. 科技与创新,2017(1):15-17.
CUI Liyue, GAO Guige, ZENG Xianwen. Research on control strategy for low voltage ride-through of direct-drive permanent magnet wind power generator[J]. Science and Technology & Innovation, 2017(1):15-17.
- [69] 吕绍峰. 永磁直驱风电系统全功率变流器并网控制技术研究[D]. 天津:天津理工大学,2019.
LYU Shaofeng. Research on grid-connected control technology of full power converter for permanent magnet direct-drive wind power generation system[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019.
- [70] 袁明华. 基于VSG的永磁直驱风电系统低电压穿越技术研究[D]. 北京:北方工业大学,2019.
YUAN Minghua. Research on low voltage ride through technology of permanent magnet direct drive wind power system based on VSG[D]. Beijing: North China University of Technology, 2019.
- [71] 周鹏,张新燕,邸强,等. 基于虚拟同步机控制的双馈风电机组预同步并网策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(14):71-78.
ZHOU Peng, ZHANG Xinyan, DI Qiang, et al. Pre-synchronous grid-connection strategy of DFIG-based wind turbine with virtual synchronous generator control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14):71-78.
- [72] 厉璇,宋强,刘文华,等. 风电场柔性直流输电的故障穿越方法对风电机组的影响[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):31-36,125.
LI Xuan, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Impact of fault ride-through methods on wind power generators in a VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11):31-36,125.
- [73] KIM C, KIM W. Coordinated fuzzy-based low-voltage ride-through control for PMSG wind turbines and energy storage systems[J]. IEEE Access, 2020, 8:105874-105885.
- [74] ZHOU A, LIY W, MOHAMED Y. Mechanical stress comparison of PMSG wind turbine LVRT methods[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, PP(99):1.
- [75] ADEFARATI T, NOZAKUZAKU M S L, NAIDOO R, et al. High gain DC-DC converter for DC power transmission for offshore wind farms[C]//2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Dubai, United Arab Emirates. IEEE, 2020:1-6.
- [76] 龚永智,陶晔,许传敏,等. 考虑风电机组馈入电流的风电场汇集线路保护整定计算方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(11):128-135.
GONG Yongzhi, TAO Ye, XU Chuanmin, et al. Relay protection setting calculation of wind farm collector lines considering wind turbine increased short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11):128-135.
- [77] 杨喆麟,汪可友,李国杰. 考虑风电不确定性的VSC-MTDC互联系统两阶段交直流最优潮流[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(14):25-34.
YANG Zhelin, WANG Keyou, LI Guojie. Two-stage AC/DC optimal power flow with VSC-MTDC considering uncertainty of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14):25-34.
- [78] LE MÉTAYER P, DWORAKOWSKI P, MANEIRO J. Unidirectional thyristor-based DC-DC converter for HVDC connection of offshore wind farms[C]//2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications. Lyon, France, 2020.

作者简介:



冯子木

冯子木(1996),男,硕士在读,研究方向为电力系统稳定性分析和新能源经柔直并网(E-mail:969971350@qq.com);

孙国强(1972),男,博士,副教授,研究方向为高压直流输电控制等;

滕德红(1978),女,通信作者,硕士,讲师,研究方向为电力系统规划与运行。

Reviews of LVRT technology for D-PMSG

FENG Zimu¹, SUN Guoqiang¹, TENG Dehong¹, LI Qun², LIU Jiankun², ZHAO Jingbo²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the large-scale development of wind power, it increases rapidly the number of directly-driven permanent magnet wind turbines connected to the grid, thus which threatens the safety and stability of operation in the power grid. The low voltage ride-through (LVRT) is the primary problem in terms of the safety of wind power connected to grid. The corresponding strategies for wind farms with directly-driven permanent magnet synchronous generator (D-PMSG) are provided from the present researches of LVRT technology for traditional wind farms and other new energy power plants. A review of mainstream LVRT technologies suitable for the features of wind farms with D-PMSG is reported. The mechanism and application of each technology are introduced. The advantages and disadvantages of different technologies are compared, and then corresponding suggestion on the future application is given out. The trend of LVRT technology is discussed. The economic and technical challenges for current large-scale grid-connected wind farms are pointed out for further research.

Keywords: low voltage ride-through (LVRT); directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator; reactive power compensation; power restoration; coordinated control

(编辑 吴楠)

(上接第 32 页)

Hierarchical active control of wind power cluster considering ordered wind turbines

CHENG Xueting¹, ZHANG Jiarui², LIU Xinyuan¹, GUO Wenbo³, ZHENG Huiping¹, BO Liming¹

(1. State Grid Shanxi Electric Power Company Research Institute, Taiyuan 030001, China;

2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,
Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China;

3. School of Arts and Sciences, University of Rochester, Rochester 14627, NY, USA)

Abstract: As wind power industry develops rapidly, the control strategy for active power of wind farms tends to be regional. In order to regulate reasonably the active power of wind power cluster and increase the amount of wind power accommodation for reducing the number of wind turbines, a stratified active power control strategy for wind power cluster considering ordered wind turbines is proposed. Firstly, according to the location of wind farms and ultra-short term prediction of wind power, the wind power of regions are divided into three control layers, namely wind farm group layer, wind farm layer and wind turbine layer. The wind farm group layer and wind farm layer are optimized to increase the accommodation of wind power by rolling optimization at different time scales. The wind turbine level calculates and ranks the control capacity scores of each turbine by selecting the evaluation indexes that affect the control ability of the wind turbines, combining the entropy method and the membership function. In this way, the number of control times of the wind turbines is reduced. Finally, the data of actual wind farms in Shanxi power grid are used to analyze by GAMS and Matlab platform. The results show that the proposed control strategy reduces the number of wind turbine control times while improving the wind power accommodation.

Keywords: wind power cluster; hierarchical control; order control; entropy method; membership function

(编辑 吴楠)