

直驱风力发电故障穿越控制方法综述

杜 雄¹,李珊瑚¹,刘义平²,周维维¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030;

2. 天津市电力公司路灯处,天津 300151)

摘要: 首先根据电网故障特征,分析了直驱风力发电机组在故障运行条件下的功率关系,根据分析结果将电网故障情况下机组实现故障穿越所面临的问题总结为由电网电压正序分量有效值下降带来的“有功不平衡”和电网电压负序分量带来的“功率波动”2类问题。在此基础上,对目前直驱风力发电机组的故障穿越方法进行了总结和分类,将“有功不平衡”控制策略分为减小发电机的输出功率来减小换流器的输入功率、在直流母线处消除不平衡功率、增大网侧换流器输出功率能力3种方法;将“功率波动”控制策略分为消除并网电流负序分量和消除直流母线电压纹波2种方法,并分析了不同方法的优缺点。根据现有方法的优缺点对直驱风力发电机组故障穿越控制方法的研究方向进行了展望。

关键词: 风力发电机组; 风电; 电网故障; 故障穿越; 有功不平衡; 功率波动

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.022

0 引言

随着风力发电在电网中所占比例的增加,电网公司要求风电系统需像传统发电系统一样,在电网发生故障时具有继续并网运行的能力。各国相继提出了越来越严格的故障穿越标准^[1],要求机组在电网故障情况下能够按照标准规定的时间继续并网运行^[1-3],我国也提出了风电场接入电网的技术要求^[4]。直驱风电机组通过全功率变流装置接入电网,一般认为全功率变流器将电网和发电机组解耦,对电网波动的适应性好,相比双馈结构更易穿越电网故障^[5]。事实上直驱机组在电网故障下运行仍然会产生很多问题。以永磁直驱风电机组为例,在电网故障情况下,以常规电流控制^[6-8]为基础的功率变流器直流母线电压可能超出额定值、网侧变换器输出电流增大可能危及电力电子器件的安全运行^[9-20]、存在网侧变换器输出功率含有2倍工频波动、直流母线电压含有2倍工频纹波、网侧变换器输出电流含有负序分量和谐波^[21-29]等问题。因此,必须解决直驱风力发电机组在电网故障下运行面临的诸多问题,提高其故障穿越能力,满足故障穿越标准。许多文献对直驱风电机组故障穿越控制进行了研究。如文献^[11-12]

提出了限制电磁功率的控制方法来减小发电机输出功率,从而限制直流母线电压上升和网侧变换器输出电流增大;文献^[13]提出了在直流侧增加卸荷负载的方法来实现直流母线电压稳定;文献^[14-18]提出在直流侧增加储能元件帮助风电机组实现故障穿越;文献^[19-20]通过在故障情况下提供无功功率来支撑电网电压,避免直流母线电压上升和网侧变换器电流增大;文献^[21-24]通过控制使在电网不对称故障情况下网侧变流器的负序电流为零,三相并网电流对称;文献^[25-28]通过控制实现不对称故障情况下,输出有功功率波动为零,维持直流母线电压稳定。

本文首先总结风电机组故障穿越标准的要求,然后依据电网故障特征^[30],通过分析电网故障情况下机组的功率关系,指出直驱风电机组在故障情况下继续并网运行将产生2类问题:一是电网电压正序分量有效值下降带来的“有功不平衡”问题,二是电网电压负序分量带来的“功率波动”问题。然后根据所总结的2类问题,将文献中报道的故障穿越控制方法进行了总结和归类。解决“有功不平衡”的方法又可归纳为3种:减小发电机的输出功率,如调节风轮机的桨距角^[9-10]、限制发电机的电磁功率等^[11-12];在直流母线处消除或存储有功不平衡,如在直流母线处增加卸荷负载^[13]、增大直流母线电容值^[14]、采用超级电容储能^[15-17]等;增大机组功率输出能力,如在故障情况下通过无功补偿来支撑接入点电压等^[19-20]。解决“功率波动”的方法又可归纳为2种:消除并网电流的负序分量的控制方法^[21-24]和消除直流母线2倍电压波动的控制方法^[25-28]。最后对各种故障穿越控制方法进行了分析和比较,总结它们的优缺点,并指出直驱风力发电机组故障穿越控制方法的进一步研究方向。

收稿日期:2012-05-31;修回日期:2012-11-16

基金项目:教育部新世纪人才计划项目(NCET-09-0839);全国优秀博士论文作者专项基金资助项目(200948);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512711101)

Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University(NCET-09-0839), Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of PR China (200948) and Scientific Research Foundation of State Key Lab of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(2007DA10512711101)

1 风电机组故障穿越并网要求

世界各国都相继制定了相应的风电机组故障穿越标准^[1],图 1 为德国、英国、美国和丹麦四国故障穿越标准中电网电压跌落程度与风电机组需持续并网运行的时间。

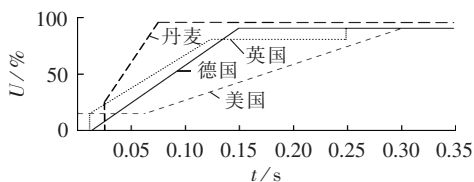


图 1 各国故障穿越标准

Fig.1 Fault ride-through standards of different countries

各国制定的故障穿越标准中,除包含图 1 所示的并网时间要求外,一般都包含以下 4 个方面的规定:

- 公共耦合点的电网电压有效值的跌落程度与要求机组继续并网运行时间长短的关系;
- 电网友电压有效值的跌落程度与输出无功功率的关系;
- 故障切除后,有功功率的恢复速率;
- 频率的波动与输出有功功率的关系。

我国国家电网公司也制定了风电机组低电压穿越标准^[4]。标准规定:风电场内的风电机组具有在并网点电压跌至 20% 额定电压时能保持并网运行 625 ms 的低电压穿越能力,如图 2 所示。风电场并网点电压在发生跌落 3 s 内能够恢复到额定电压 90% 时,风电场内的风电机组保持并网运行;在故障切除后,以至少 10% 额定功率/秒的功率变化率恢复至故障前的值。

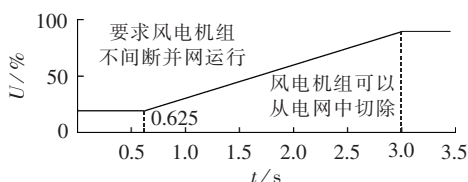


图 2 中国的低电压穿越标准

Fig.2 LVRT standard of China

为了满足各国的风电机组故障穿越标准,需解决电网故障给直驱风电机组所带来的各种问题^[2-3]。目前报道的大部分研究低电压穿越控制的方法都针对上述故障穿越标准要求 a 开展研究,只有少数文献对要求 c 进行了讨论^[19-20],因此本文综述的各种故障穿越控制方法也主要是针对要求 a。

2 电网故障特征与直驱风电机组故障穿越面临的问题

2.1 电网故障特征

电网故障可分为对称故障和不对称故障两大

类^[30]。对称故障为三相接地短路,其故障特征为电网电压(正序分量)有效值下降,其下降程度与故障点和公共耦合点的距离有关。不对称故障包括单相接地短路、两相接地短路和相间短路 3 类。不对称故障情况下,三相电压值会按照不同规律发生改变,但存在一个共同的规律,即电网电压会产生负序分量,同时正序分量有效值下降。因此,不对称故障除包含对称故障电压下降的特征之外,还会产生负序分量。下面将会通过直驱风电机组的功率分析表明:故障情况下,电网电压正序分量下降和负序分量会产生不同的问题。因此文中将故障穿越控制方法按照这 2 个故障特征产生的问题进行总结和分类,而不是简单地直接按照对称故障和不对称故障进行分类。

2.2 直驱风力发电机组的功率分析

图 3 为永磁直驱风力发电机组的拓扑结构。

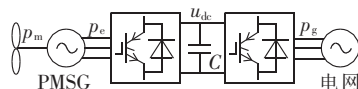


图 3 PMSG 风电机组拓扑结构

Fig.3 Topology of PMSG wind turbine

在不考虑损耗的情况下,涡轮机输出的机械功率 p_m 、发电机输出的电磁功率 p_e 和风电机组的并网功率 p_g 满足如下的功率平衡方程:

$$p_m - p_e = \frac{d\left(\frac{1}{2}J\omega^2\right)}{dt} \quad (1)$$

$$p_e - p_g = \frac{d\left(\frac{1}{2}Cu_{dc}^2\right)}{dt} \quad (2)$$

其中, J 为涡轮机和发电机转动惯量之和; ω 为发电机的机械角速度; C 为直流母线电容。

在稳态时, $p_m = p_e = p_g$,发电机转速恒定,直流母线电压也稳定。但下一节的分析将会表明在电网故障情况下,功率平衡关系被打破,会导致一系列的问题。

2.3 直驱风电机组故障穿越面临的问题

2.3.1 电网电压正序分量降低时的问题

从 2.1 节的分析可知,电网对称故障或不对称故障均会使电网电压正序分量有效值降低。当电网电压跌落时,由于网侧换流器的输出电流限制,风电机组并网输出功率 p_g 将减小,假设故障瞬间风速不变,发电机的转速也不变,那么风电机组输入机械功率 p_m 不变,如果发电机的输出电磁功率 p_e 也不变,将导致风电机组的输入、输出的有功不平衡,会产生不平衡功率 Δp :

$$\Delta p = p_e - p_g \quad (3)$$

由式(2)可知,不平衡功率 Δp 将导致直流母线电压 u_{dc} 上升。如果网侧换流器不采取限流措施,将

会使输出电流增大。当直流母线电压超过电容的耐压值、电流超过功率器件的耐流值时,风电机组就会自动切机,无法实现故障穿越。

因此,针对电网电压正序分量降低时“有功不平衡”产生的直流母线电压上升、输出电流增大的问题,解决的措施是消除不平衡功率 Δp 来提高故障穿越能力,第3节将会对文献中消除有功不平衡的方法进行总结和比较。

2.3.2 电网电压产生负序分量时的问题

电网不对称故障情况下,除正序分量有效值下降外,还会产生负序分量。由于负序电压分量的存在,将会在网侧电流中产生负序电流和谐波分量,同时还会引起并网功率的波动。在 dq 轴系下进行分析时,分别将电网电压/电流的正、负序分量变换到正、负序 dq 轴系,可得到正、负序分量分别在正、负序 dq 轴上的直流分量。记 e_{dp}, e_{qp} 分别为电网电压正序分量的正序 dq 轴系变换结果; e_{dn}, e_{qn} 为电网电压负序分量的负序 dq 轴系变换结果; i_{dp}, i_{qp} 为电网电流正序分量的正序 dq 轴系变换结果; i_{dn}, i_{qn} 为电网电流负序分量的负序 dq 轴系变换结果。不对称电网电压在正序 d, q 轴系的变换结果可表示为:

$$\begin{cases} e_d = e_{dp} + e_{dn} \cos(2\omega t) + e_{qn} \sin(2\omega t) \\ e_q = e_{qp} - e_{dn} \sin(2\omega t) + e_{qn} \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

其中, e_d, e_q 分别为含负序分量的电压直接变换到正序 dq 轴系的 d, q 轴分量。

从式(4)可以看出,负序电压分量在正序 dq 轴系下含有2倍工频分量。在常规的 dq 轴电流控制中, dq 轴的2倍工频电压分量将会被引入到参考电流中^[22],其表达式为:

$$\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_d & e_q \\ e_q & -e_d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_{ref} \\ q_{ref} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, i_{dref}, i_{qref} 分别为根据功率参考信号 p_{ref}, q_{ref} 得到的电流参考信号。将式(5)展开, dq 轴参考电流含有2次及以上谐波,那么根据畸变的参考信号控制得到的实际三相电流将会含有负序分量以及谐波分量。这说明电压负序分量将会导致电流不对称和畸变。

当电网电压不对称时,由于电流中也同时含有负序分量,并网有功 p_g 和无功 q_g 也可采用 dq 轴分量表示为^[27]:

$$\begin{cases} p_g = P_{g0} + P_{g\cos} \cos(2\omega t) + P_{g\sin} \sin(2\omega t) \\ q_g = Q_{g0} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{g0} = \frac{3}{2} (e_{dp} i_{dp} + e_{qp} i_{qp} + e_{dn} i_{dn} + e_{qn} i_{qn}) \\ Q_{g0} = \frac{3}{2} (e_{qp} i_{dp} - e_{dp} i_{qp} - e_{qn} i_{dn} + e_{dn} i_{qn}) \\ P_{g\cos} = \frac{3}{2} (-e_{dp} i_{dn} + e_{qp} i_{qn} + e_{dn} i_{dp} + e_{qn} i_{qp}) \\ P_{g\sin} = \frac{3}{2} (e_{qp} i_{dn} - e_{dp} i_{qn} + e_{dn} i_{qp} - e_{qn} i_{dp}) \end{cases} \quad (7)$$

从式(6)可以看出,并网有功功率除直流分量 P_{g0} 外,还含有2倍工频的波动分量,其峰值 P_{g2} 由式(6)中有功正弦和余弦分量共同决定,为:

$$P_{g2} = \sqrt{P_{g\cos}^2 + P_{g\sin}^2} \quad (8)$$

由于并网有功功率存在波动,从式(2)可知,交直交流变器的直流母线电压将会产生2次工频纹波。当直流母线电压波动过大时,将导致风机切机。

从上述分析可知,电网故障下的电压负序分量在常规电流控制方式下将导致并网电流产生负序分量。由于电压、电流均存在正、负序分量,将产生式(6)所示的“功率波动”问题。根据交流侧和直流侧的功率平衡,交流侧的功率波动会导致直流母线电压2倍工频波动。因此不对称情况下直驱风电机组故障穿越将面临“功率波动”、并网电流中产生电流负序分量和直流母线电压2倍工频纹波等问题。

3 有功不平衡控制策略

消除由电网电压跌落带来的“有功不平衡”问题,文献中报道的方法可以分为3类:减小发电机的输出功率来减小换流器的输入功率;在直流母线处消除不平衡功率;增大网侧换流器输出功率能力。

3.1 减小换流器输入功率

减小换流器输入功率法按照响应速度的快慢,又可分为调节风轮机的桨距角和限制发电机的电磁功率2种。

3.1.1 桨距角调节

风轮机捕获风能的大小与桨距角相关。在正常工况下,一般控制桨距角来实现最大功率跟踪^[9]。在电网故障情况下,同样也可通过调节桨距角使其不工作在最大功率点。文献[10]通过调节桨距角来减小风轮机捕获的机械能 p_m ,从而减小发电机输出功率 p_e 来实现风电机组有功平衡。该方法不需要增加额外的硬件,但由于桨距角调节属于机械调节,动态响应时间通常在几百毫秒乃至秒级^[12],且该方法存在较大的延时,因此只适用于长时间故障。考虑故障恢复时间,对于几个工频周期的电压暂降而言,采用变桨距调节很难有效地限制发电机的输入机械功率,需要其他方法来实现故障穿越。

3.1.2 限制发电机的电磁功率

为了快速限制输入功率,文献[11-12]提出在电网发生故障时,通过机侧换流器的控制限制发电机的电磁功率 p_e 来消除不平衡功率 Δp ,将多余的机械能转化为转子动能,使转子加速。由于机组转动惯量常数 H 一般为秒级,对于持续时间为几个工频周期短的电网短路故障而言,转子转速的增量很小,可认为转速几乎不变。当故障切除后,转子转速将自动下降,且转子存储的动能将释放回电网。故障后恢复

时间 t_r 可表示为:

$$t_r = \frac{W_r}{k_i p_{eN}} = \frac{\Delta p t_f}{k_i p_{eN}} \quad (9)$$

其中, W_r 为故障期间转子储能的动能, Δp 为有功不平衡量, t_f 为故障持续时间, p_{eN} 为电磁功率的额定值, k_i 为换流器的过流系数。

从式(9)可以看出,故障恢复时间与故障期间的有功不平衡 Δp 和故障持续时间 t_f 成正比,与换流器过流能力成反比。以 $\Delta p = 0.4 p_{eN}$ 、换流器过流系数为 0.2 为例,故障恢复时间将为故障持续时间的 2 倍。在故障恢复过程当中,若再次发生故障,由于发电机转子动能还未全部转化为电能,又需要将一部分机械能转化为转子动能,使其转速在前次故障的基础上加速,有可能导致发电机失速,而不能继续并网运行^[1]。

3.2 直流母线处消除不平衡功率

在直流母线处消除不平衡功率可以分为增大直流母线电容、直流母线处增加卸荷负载和采用储能装置 3 种。

3.2.1 增大直流母线电容

为了在直流母线处消除不平衡功率,最直观的就是将母线电容作为储能元件。文献[14]对增大直流母线电容进行了讨论。直流母线电容值可以根据下式确定:

$$C = \frac{2 \Delta p t_f}{U_{dmax}^2 - U_{dmin}^2} \quad (10)$$

其中, U_{dmax} 和 U_{dmin} 分别为直流母线电压的允许最大值和最小值。

虽然该方法不需要改变任何控制策略,只需将直流侧的电容增大,但电容值需急剧增大才能存储功率差额。直流母线的电解电容极易受损,是影响机组可靠性的重要因素,从体积和可靠性的角度都希望电解电容值尽可能小。因此,通过增大直流母线电容来存储功率的能力有限。

3.2.2 直流母线处增加卸荷负载

为了避免增大直流母线电容的缺点,可以通过在直流母线处增加卸荷负载的方法来消耗不平衡功率 Δp ^[13]。卸荷负载功率的控制可以通过卸荷开关的占空比来实现:

$$\Delta p = \frac{(D u_{dc})^2}{R} \quad (11)$$

其中, D 为卸荷负载开关的占空比, R 为卸荷负载的电阻值。

该方法能快速消除有功功率的不平衡,但会将能量消耗掉,同时给系统带来安装及散热等问题。

3.2.3 采用储能装置

为了减小损耗,可以采用储能元件对不平衡功

率进行储存实现故障穿越,还可以平滑有功功率的输出^[15]。文献[16-17]在直流母线处加入超级电容进行储能,文献[18]采用飞轮储能系统来解决不平衡有功功率 Δp 。在永磁同步直驱风电机组中交直交变频器直流母线加入超级电容储能的结构如图 4 所示,可以通过对双向 DC-DC 变换器的控制来消纳在故障期间输入、输出功率的差值,消除有功功率不平衡的问题,避免直流母线电压的泵升^[31]。

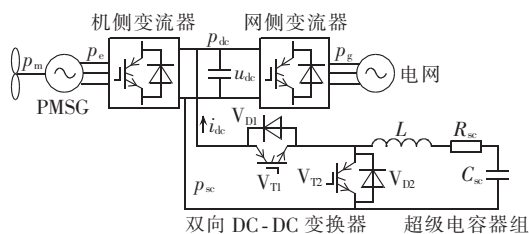


图 4 含超级电容储能的永磁同步直驱风电机组
Fig.4 PMSG wind turbine with super-capacitors

采用储能装置的方法可以很好地解决有功不平衡的问题,实现故障穿越,但储能元件的成本高,另外储能系统的能量管理和控制也需要额外的研究,目前尚未大范围应用,是一种很有发展前途的方案。

3.3 增大网侧换流器输出功率能力

增大网侧换流器输出功率能力主要是在电网电压出现偏差时采用无功补偿的方式实现电压支撑。实现无功补偿的方法有通过改变网侧变换器的控制策略来输出无功电流^[19]和通过无功补偿器补偿无功功率^[20]。该方案一般应用于电压偏差范围较小的情况,在严重短路故障情况下,通过无功补偿的方法来实现电压支撑的能力有限。

4 功率波动控制策略

消除电网电压不对称带来的功率波动问题,是目前文献中讨论的热点。从消除功率波动的出发点和实际效果可以将这些方法归纳为 2 类:消除并网电流负序分量的控制方法和消除直流母线电压纹波的控制方法。

4.1 消除并网电流负序分量控制

在电网电压不对称情况下,可以根据电压和电流分别在正负序 dq 轴下的分量确定电流环的参考信号:

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_{dp} & e_{qp} \\ e_{qp} & -e_{dp} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{g0}^* \\ Q_{g0}^* \end{bmatrix} \quad (12)$$

该电流参考信号只含有正序分量,与实际电流的误差信号经过电流误差放大器后,得到网侧换流器的电压正序参考信号 u_{dp}^*, u_{qp}^* ;再加入网侧电压前馈信号^[22]和解耦项,得到换流器的电压参考信号如式(13)所示,其控制框图如图 5 所示。

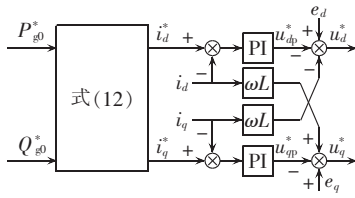


图 5 消除并网电流负序分量控制框图

Fig.5 Block diagram of grid-side negative-sequence current control

$$\begin{cases} u_d^* = -u_{dp}^* + e_d \\ u_q^* = -u_{qp}^* + e_q \end{cases} \quad (13)$$

除采用引入电压前馈的方法外,还有采用谐振控制器^[24]等其他控制策略来消除并网负序电流。

采用消除负序电流控制方法后,虽然消除了注入电网的负序电流,但由于不对称故障情况下,电压含有负序电压,负序电压和正序电流同样会产生 2 倍工频纹波波动,因此该方法仍然会产生直流母线的 2 倍工频纹波波动。

4.2 消除直流母线电压纹波控制

从 2.3.2 节的分析可知,消除直流母线电压 2 倍工频纹波的关键是消除并网功率波动。根据式(7),可以在正负序 dq 轴系下,根据正负序电压分量的大小合理地设置正负序电流参考值,使功率波动分量 $P_{g\cos}$ 和 $P_{g\sin}$ 为 0,采用双 dq 轴控制可以消除功率波动。正负序参考电流值可以按照式(14)确定^[25]。

$$\begin{bmatrix} i_{dp}^* \\ i_{qp}^* \\ i_{dn}^* \\ i_{qn}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_{dp} & e_{qp} & e_{dn} & e_{qn} \\ e_{qp} & -e_{dp} & e_{qn} & -e_{dn} \\ e_{dn} & e_{qn} & e_{dp} & e_{qp} \\ e_{qn} & -e_{dn} & -e_{qp} & e_{dp} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{g0ref} \\ Q_{g0ref} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

从式(14)可知正负序电流需采用双 dq 轴控制,其控制框图如图 6 所示。

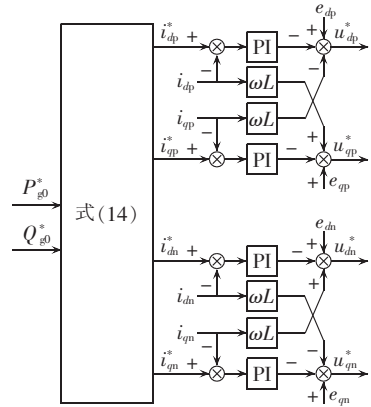


图 6 消除直流母线电压纹波控制框图

Fig.6 Block diagram of DC-bus voltage ripple control

消除直流母线电压纹波的方法是通过在电网电流中产生一定比例的电流负序分量来消除直流母线 2 倍工频纹波,但将导致电网电流不对称。除采用双 dq 轴解耦方法外,还有采用直流母线电压波动反馈^[28]等其他控制策略来消除直流母线电压纹波的方法。

5 故障穿越控制方法优缺点比较

文中讨论的各种故障穿越控制的优缺点总结如表 1 所示。从表 1 可以看出,解决“有功不平衡”问题的 3 类方法在动态响应速度、效率、体积和成本等方面各有优缺点;解决“功率波动”问题的 2 类方法均只能解决直流母线 2 倍工频纹波和并网电流负序分量中的一个方面。因此,直驱风力发电系统的低电压穿越控制仍然需要进行深入的研究,具体内容将在后节结论中指出。

表 1 直驱风电机组故障穿越控制方法优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of fault ride-through control strategy for direct-drive wind turbine

故障穿越控制方法	优点	缺点
减小换流器输入功率	桨距角调节 限制发电机的电磁功率	无额外硬件 无额外硬件,动态响应快
直流母线处消除不平衡功率	增大直流母线处电容 直流母线处增加卸荷负载 采用储能装置	动态响应慢 储能有限,故障恢复时间长 结构简单,动态响应快 动态响应快 动态响应快,效率高
增大网侧换流器输出功率能力	采用无功补偿	体积大,可靠性差,储能有限 效率低,体积大,散热难 成本高,控制复杂
消除“有功不平衡”控制方法	消除并网电流负序分量控制	需额外无功的容量,消除不平衡功率能力有限
消除“功率波动”控制方法	消除直流母线电压纹波控制	直流母线含有 2 倍工频纹波,网侧输出功率含有波动
	正、负序独立控制,直流侧电压无波动,网侧输出功率无波动,并网电流无畸变	并网电流含有负序分量

6 结语

本文根据电网故障特征将直驱风力发电机组实现故障穿越面临的问题归结为由电网电压正序分量有效值下降带来的“有功不平衡”和电网电压负序分量带来的“功率波动”两大类。根据总结的两大类问

题,对目前直驱风力发电机组的故障穿越控制策略进行了总结,分别又将解决“有功不平衡”问题的控制方法归纳为 3 类,解决“功率波动”问题的控制方法归纳为 2 类。分别分析总结了不同方法的优缺点,依据文中的分析结果,笔者认为直驱风电机组故障穿越的深入研究可从以下几个方面进行:

a. 目前解决“有功不平衡”问题的各种方法各有优缺点,可以考虑将2种或多种方法结合起来研究组合方法,综合各种方法的优点;

b. 寻找一种能同时解决电网电压负序分量带来的并网电流负序分量和直流母线电压纹波的方法是直驱式风力发电机组提高故障穿越能力的一个研究方向;

c. 在电网不对称故障的情况下,如何协调控制“有功不平衡”和“功率波动”这2类问题也是直驱风电研究的一个方向;

d. 随着储能装置成本的降低,将储能装置应用于直驱风力发电系统实现低电压穿越控制的深入研究也将是一个有意义的研究方向。

参考文献:

- [1] TSILI M, PAPATHANASSIOU S. A review of grid code technical requirements for wind farms[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(3): 308-332.
- [2] CHAI C I, LEE W J, FUANGFOO P, et al. System impact study for the interconnection of wind generation and utility system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(1): 163-168.
- [3] 蒯红, 晁勤. 并网型直驱式永磁同步风力发电系统暂态特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 1-5.
LIN Hong, CHAO Qin. Simulation and analysis of transient characteristics of grid-connected direct-drive wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 1-5.
- [4] 中国电力科学研究院. 中国电网发展[2009]779号 国家电网公司风电场接入电网技术规定[S]. 北京: 中国风能信息中心, 2009.
- [5] ZHE Chen, GUERRERO J M, BLAABJERG F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(8): 1859-1875.
- [6] 李建林, 高志刚, 胡书举, 等. 并联背靠背 PWM 变流器在直驱风力发电系统的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 59-66.
LI Jianlin, GAO Zhigang, HU Shuju, et al. Application of parallel back-to-back PWM converter on the direct-drive wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 59-66.
- [7] 陈瑶. 直驱型风力发电系统全功率并网变流技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
CHEN Yao. Research on full power conversion technology of direct-driven wind generation system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [8] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.
- [9] GENG Hua, YANG Geng. Output power control for variable-speed variable-pitch wind generation systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 494-503.
- [10] YANG Xiaoping, DUAN Xianfeng, FENG Fan, et al. Low voltage ride-through of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[C]//Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China; [s.n.], 2009: 1-5.
- [11] ABEDINI A, NASIRI A. PMSG wind turbine performance analysis during short circuit faults[C]//IEEE Canada Electrical Power Conference. Montreal, Canada; IEEE, 2007: 160-165.
- [12] 姚骏, 廖勇, 庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 91-96.
YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. A low voltage ride-through control strategy of permanent magnet direct-driven wind turbine under grid faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 91-96.
- [13] HAQUE M E, NEGNEVITSKY M, MUTTAQI K M. A novel control strategy for a variable-speed wind turbine with a permanent-magnet synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(1): 331-339.
- [14] CONROY J F, WATSON R. Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(3): 182-189.
- [15] ABBEY C, JOOS G. Supercapacitor energy storage for wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 769-776.
- [16] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 331-340.
- [17] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. Integration of an energy capacitor system with a variable-speed wind generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 740-749.
- [18] KHATERCHI M, BELHADJ J, ELLEUCH M. DPC for three-phase inverter to improve the integration of wind turbine associated to flywheel energy storage system into the grid[C]//SSD'09. 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Djerba, Tunis; [s.n.], 2009: 1-6.
- [19] MORREN J, PIERIK J T G, de HAAN S W H. Voltage dip ride-through control of direct-drive wind turbines[C]//39th International UPEC. Bristol, United Kingdom; [s.n.], 2004: 934-938.
- [20] 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.
- [21] SACCOMANDO G, SVENSSON J, SANNINO A. Improving voltage disturbance rejection for variable-speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(3): 422-428.
- [22] KIM H S, MOK H S, CHOE G H, et al. Design of current controller for 3-phase PWM converter with unbalanced input voltage[C]//IEEE PESC. Fukuoka, Japan; IEEE, 1998: 503-509.
- [23] ALEPUZ S, BUSQUETS-MONGE S, BORDONAU J. Predictive current control of grid-connected neutral-point-clamped converters to meet low voltage ride-through requirements[C]//IEEE PESC. Rhodes, Greece; IEEE, 2008: 2423-2428.
- [24] SATO Y, ISHIZUKA T, NEZU K, et al. A new control strategy for voltage-type PWM rectifiers to realize zero steady-state control error in input current[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(3): 480-486.
- [25] MORAN L, ZIOGAS P D, JOOS G. Design aspects of synchronous PWM rectifier-inverter systems under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(6): 1286-1293.

- [26] SONG H S, NAM K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [27] NG C H, RAN L, BUMBY J. Unbalanced-grid-fault ride-through control for a wind turbine inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 845-856.
- [28] 赵紫龙, 吴维宁, 王伟. 电网不对称故障下直驱风电机组低电压穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 87-91.
ZHAO Zilong, WU Weining, WANG Wei. A low voltage ride through technology for direct-drive wind turbines under unbalanced voltage dips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 87-91.
- [29] ALEPUZ S, BUSQUETS-MONGE S, BORDONAU J, et al. Control strategies based on symmetrical components for grid-connected converters under voltage dips[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2162-2173.
- [30] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 119-136.
- [31] 张坤, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于储能的直驱风力发电系统的功率控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 7-14.
ZHANG Kun, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Power control strategy of directly drive wind turbine with energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 7-14.

作者简介:

杜 雄(1979-), 男, 湖北松滋人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力电子变换器拓扑、建模与控制、可再生能源发电、航空电源系统等(**E-mail**: duxiong@cqu.edu.cn);

李珊珊(1985-), 女, 湖南湘潭人, 硕士, 研究方向为直驱风力发电和三相整流器;

刘义平(1985-), 男, 湖北京山人, 助理工程师, 研究方向为 LED 在路灯中的应用;

周维维(1954-), 男, 四川都江堰人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力电子技术、电路理论及应用。

Review of fault ride-through control for direct-drive wind turbine

DU Xiong¹, LI Shanhu¹, LIU Yiping², ZHOU Luwei¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Tianjin Power Street Light Management Department, Tianjin 300151, China)

Abstract: The power relationship of direct-drive wind turbine operating under fault conditions is analyzed based on the characteristics of grid fault and the problems existing in the fault ride-through of unit under fault conditions are classified into two categories: active power imbalance and power fluctuation. The fault ride-through methods of direct-drive wind turbine are summarized and classified. The control strategies for active power imbalance are classified into three types: reduce the input power of converter by limiting the output power of generator, eliminate the power imbalance at DC-bus and increase the power output capability of grid-side converter. The control strategies for power fluctuation are classified into two types: eliminate the grid-side negative sequence current and eliminate the second-order ripple of DC bus voltage. The advantages and disadvantages of each control strategy are analyzed, based on which, the research direction of fault ride-through control for direct-drive wind turbine is prospected.

Key words: wind turbines; wind power; grid fault; fault ride-through; active power imbalance; power fluctuation

国电南自成功进入抽水蓄能电站市场

近日, 国电南京自动化股份有限公司(以下简称国电南自)与中国南方电网调峰调频发电公司正式签署深圳抽水蓄能电站安全监测系统工程施工合同, 标志着国电南自成功进入抽水蓄能电站市场。

深圳抽水蓄能电站装机容量4台300 MW, 距深圳市中心约20 km, 距离香港、大亚湾核电站、岭澳核电站约25 km, 处于广东的电力负荷中心, 同时又是西电东送的落点和粤电网的连接点。该项目为南方电网重点工程, 技术要求高, 国电南自为该项目提供了仪器设备、自动化系统、工程施工、观测及资料整编分析自动化系统集成等技术和产品。

(国电南京自动化股份有限公司 李 维 刘 婕)