

基于低电压穿越能力的风电并网点继电保护的研究

在分析各国有关风电场继电保护配置情况的基础上,指出了在风电场保护动作切除产生的故障之前,风电机组已经脱网,没有考虑风电机组对系统的作用。其次,对所构建的风电机组低电压穿越(LVRT)能力及其相关系统继电保护之间配合的实现进行深入分析研究,并验证输电系统继电保护以及风电场自身保护所应有的配合关系。为了防止具有LVRT能力的风力发电机(以下简称风机)投入系统导致传统的继电保护误动,提出在风机并网点采用电压电流保护的方法。电网发生故障或波动引起电流衰减,采用低电压保持的延迟电流保护来消除双馈异步风力发电机短路电流衰减对保护的影响。利用该保护对搭建的系统图进行仿真,得出保护跳闸情况,并与传统的保护进行分析对比。

郭新军 雷万忠/河南工程学院电气信息工程学院
耿 都/电子科技大学微电子与固体电子学院



郭新军/副教授

关键词/Keywords

LVRT能力·
继电保护·
短路电流·
风力发电·

风电具有随机性和不可预测性,并网后导致传统电力系统事故的发生率以及故障范围比之前大。我国东北地区、甘肃酒泉和宁夏等风电基地,曾多次发生因小的电网故障造成大面积风电机组被切除的事故,损失出力最高达到百万千瓦,造成事故扩大^[1]。我国大规模风电基地一般都直接并入220 kV及以上的主网,而我国220 kV及以上的主网继电保护配置很完善,事故快速切除率多年保持在100%,常规的电压电流保护即可保证系统可靠运行^[2]。而具有低电压穿越(LVRT)能力的风力发电机(以下简称风机)并入电网后,输出的电压电流特性发生了变化,常规的电压电流保护将不再适用。如当出口母线电压波动超出预设值(如额定电压的 $\pm 10\%$)时,风机被切除退出运行^[3],大量风电机组在电网故障时被同时切除,将对电

网的稳定运行和供电可靠性带来严重影响,与风电相关的继电保护研究成为热点之一。但这些方案中,采用的风机都不具有LVRT能力。文献[2]从酒泉风电基地大规模脱网故障情况得出,低电压切除风机的比例越来越大。因此,风电机组和风电场满足并网技术要求,具备LVRT能力是遏制风电机组大规模脱网事故的关键。虽然风电机组的LVRT技术已经掌握,现在正在加紧改造实施,但是没有与具有LVRT能力的风机相配合的继电保护,风机的LVRT能力就很难得到充分的利用。文献[4]通过研究LVRT能力风机并网点电压的跌落程度,提出了自适应电压跌落特性的馈线低电压保护算法,但是很难应用在应用中。文献[5]从提高双馈异步风力发电机(DFIG)故障穿越能力的角度上,提出了一套适用在风电场并网点新型复合式电流-电压保护方案,但是并没有对保护进行模拟仿真,只是用数据说明保护能可靠动作。

目前的研究大多只是从理论上对与LVRT相配合的保护进行分析,对其进行仿真验证的极少。本文基于具有LVRT的DFIG,首先分析故障时,故障穿越过程中DFIG电压电流输出特性。在满足我国规定的风电场低电压要求基准下,Crowbar动作时,电流保护整定值的变化,根据故障情况下的电流输出特性以及电压跌落程度,提出在风机并网点采用多段式电压电流保护代替常规的电压电流保护,并用PSCAD软件搭建保护模型,通过仿真验证了相关结论。

LVRT问题概述

1. LVRT含义

LVRT能力指在电网发生故障或波动时, 风机或大型光伏电站并网点发生电压跌落时, 风机能够保持并网, 甚至向电网提供一定的无功功率, 支持电网恢复, 直到电网恢复正常, 从而“穿越”此低电压时间(区域)。

2. LVRT要求

为避免外部电网故障导致大量风机从系统中解列, LVRT标准的建立成为亟待解决的问题, 各国纷纷建立以各自电网条件为基础的LVRT并网标准。我国国家电网2009年底颁布的《风电场接入电网技术规定》中, 明确规定风电场LVRT的运行区域, 如图1所示。

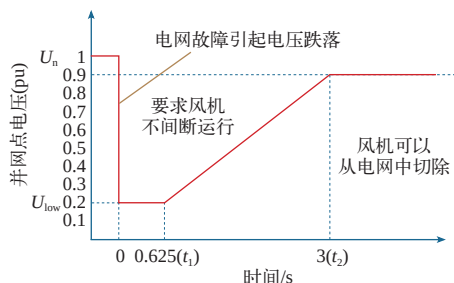


图1 风电场LVRT要求

当电网电压跌出风电机组允许电压波动范围 $\pm 10\%$ 后, 要求风机对电网进行支撑。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, 能够保证不脱网连续运行625 ms的能力; 风电场并网点电压在发生跌落后2 s内能够恢复到额定电压的90%时, 风电场内的风电机组能够保证不脱网连续运行。对不同故障类型, 风电场并网点任意一线电压低于或部分低于图1中电压轮廓线时, 场内风电机组允许从电网切出。并且要求对电网故障期间没有切出电网的风电场, 其有功功率在电网故障清除后应快速恢复, 以至少10%额定功率/秒的功率变化率恢复至故障前的值。

DFIG LVRT技术

1. DFIG原理及结构

DFIG是一种绕线转子异步发电机, 应用的

是交流励磁变速恒频双馈风力发电技术。采用背靠背的双PWM变流器控制发电机的励磁, 定子绕组产生的工频交流电直接馈入电网, 转子功率通过变换器接入电网, 实现双向功率控制。DFIG能够较为平滑地改变并网运行条件, 实现软并网。

2. DFIG LVRT技术介绍

电网发生故障或波动时, 外部电压骤降, 转子内感生的涌流将对连接的逆变器造成损害, 风机就实施被动式自我保护而立即解列。为达到风机的LVRT, 目前国内外学者已对之做了大量研究, 提升DFIG组LVRT运行能力的技术从无须增加硬件设备的软件改进和须增加硬件设备两个角度总结归纳了实现LVRT技术方法共五类^[6]: ①改进的矢量控制和鲁棒控制; ②定子侧弱电气连接技术; ③直流母线上方法; ④转子侧方法; ⑤变桨距机构控制技术。

3. Active Crowbar的结构与控制

当今主流技术是在转子侧连接Crowbar电路, 具备Crowbar电路的DFIG具有较好的暂态特性^[7], 为大的激升电流提供旁路, 短接转子逆变器, 进而达到保护变频器的目的。Crowbar电路主要分为被动保护型的Crowbar电路和主动保护型的Crowbar电路。本文采用选用的Active Crowbar由一个三相二极管整流桥, 单管IGBT及放电电阻组成, 其中三相整流桥与发电机转子相连, IGBT用来控制Crowbar电路的开通或关断。采用单管IGBT的结构有利于简化Crowbar的控制。由于故障过程中过电流冲击较大, 实际设计中采用多个单管IGBT并联的结构^[8]。图2为带IGBT型主动式Crowbar电路的DFIG系统示意图。

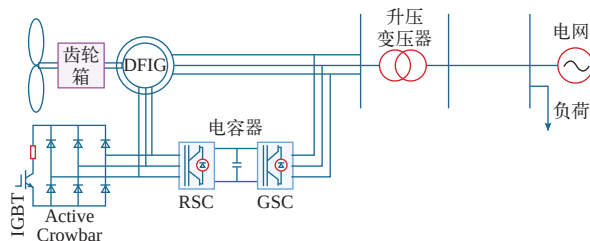


图2 含主动式Crowbar电路的DFIG示意图

Crowbar接入后DFIG的电流特性

1. 电网故障时的DFIG暂态电流方程

DFIG的故障定、转子电流由稳态分量和暂态分量组成，Crowbar保护电路投入运行后，对转子电流的衰减速度和电流峰值有很大影响。

通过分析，得出DFIG的定、转子电流为

$$i_s = \frac{E_g}{\omega_0 L'_s} \left(e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} - \frac{L_m^2}{L_s L_r} e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_r}} \right) \quad (1)$$

$$i_r = \frac{E_g}{\omega_0 L'_r L_s} \frac{L_m}{L_s} \left(e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_r}} - e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} \right) \quad (2)$$

$$L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \quad (3)$$

$$L'_r = L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \quad (4)$$

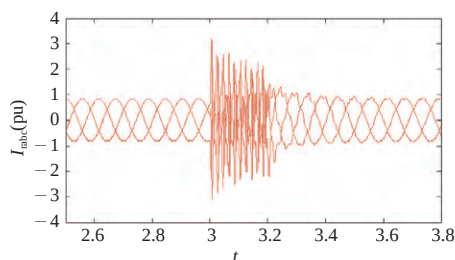
式中， E_g 为风电机组的机端电压； L_m 、 L_s 和 L_r 为等效的励磁电感、定子电感和转子电感； ω_0 、 ω_r 和 ω_s 分别为DFIG定子电压角频率、转子角频率以及转差角频率； T_s 、 T_r 为定、转子回路短路时的电流衰减时间常数。

系统发生故障后，Crowbar电路开始工作，旁路电阻 R_c 串接在DFIG的转子绕组上，转子电流的衰减时间常数变为 $T_r^* = L'_r / (R_r + R_c)$ 。 R_r 为转子电阻， T_r^* 变小会加速转子电流的衰减，从而进一步抑制故障电流。

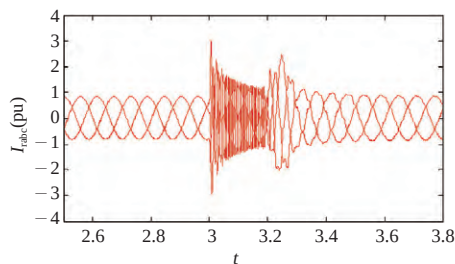
2. 仿真研究

图3为PSCAD平台下风机外部发生三相短路故障时，双馈单机转子电流在无保护电阻和有保护电阻（ $R_c = 1.5 \Omega$ ）情况下的仿真波形，故障发生时刻为3.0 s，持续时间0.2 s。

从图3a可以看出，无Crowbar保护时，故障时



(a) 无保护电阻的DFIG转子电流



(b) 带保护电阻的DFIG转子电流

图3 三相短路故障时的DFIG转子电流

转子电流峰值将达到3.2 (pu)，并且在无Crowbar保护时，故障期间转子侧变换器一直在试图调节转子电流，这样使得转子故障电流的谐波成分更加严重。由图3b可以看出，采用Crowbar保护后，加快转子电流的衰减，有效地抑制了故障电流的上升，使得故障电流在1.5 (pu) 左右。从仿真结果可以看出采用Crowbar保护策略可以加速电磁暂态过程的衰减，抑制转子过电流，从而保证风电机组的安全。

多段式电压电流保护

1. 多段式电压保护

(1) 多段式电压保护原理

由图1风电场LVRT能力要求可以看出，在电网发生故障或波动后，风机不脱网运行区域不同时间段内对风机并网点电压的要求不同，因此仅仅只设定一个整定值的电压保护将不再适用，只要电压降落到保护值以下，保护就跳闸，风机就进行脱网运行，无法满足我国在故障时对风机的要求。因此，需要在不同时间段内设置不同的电压保护整定值，在故障后固定的时间段内，测量电压大于整定值，保护就不会跳闸。使风机的LVRT能力得到发挥，多段式电压保护应时而生。

(2) 保护动作方程

从对风电场LVRT要求的规定来看，只要测量电压的标幺值在图1的折线以上，保护就不会动作。将折线分成不同的故障区域，首先是对电压跌落后的最小值的规定，然后是故障后的恢复区域以及电压与时间呈线性关系，最后是在故障后

规定的时间内电压恢复值的要求。根据上述的分析,可列出多段式电压保护的动作方程

$$\begin{cases} U < U_{\text{low}} \\ U < U_{\text{low}} + (0.9U_N - U_{\text{low}}) \left(\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right) & t_1 < t < t_2 \\ U < 0.9U_N & t > t_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, U 为风机并网点测量电压; U_{low} 为风机所能承受的母线电压跌落最低值; t_1 、 t_2 为当前时刻 (见图1), 以故障发生时刻为起点。

2. 改进电流保护原理

电流增大是电力系统中发生短路故障的基本特征, 利用此特征实现的保护是最早得到应用的继电保护原理。I 段、II 段和 III 段组成的阶段式电流保护, 其最主要的优点就是简单、可靠, 并且在一般情况下也能够满足快速切除故障的要求, 用于保证联络线故障的快速切除以及作为相邻线路的后备保护。电网故障期间, DFIG 转子侧 Crowbar 保护动作, 将造成故障峰值减小, 并且电流迅速衰减, 波形参见图3b。因此需对保护整定值重新整定, 而且对于传统的 II 段和 III 段延迟保护, 有可能发生拒动, 因此必须采取一定的改进措施。

由于故障期间 Crowbar 保护动作对电压跌落影响很小, 因此采用低电压保持的延迟电流保护来消除 DFIG 短路电流多态性的影响, 以保证保护的有效动作。即只要过电流元件动作, 低电压条件满足, 保护就一直动作, 此时的低电压取决于采用 Crowbar 保护动作时机端电压的跌落程度。

仿真验证

系统接线参见图2, 用 PSCAD 软件建立仿真模型, 搭建出多段式电压电流保护模块。不同的故障类型情况下, 产生的故障电流以及电压骤降的程度不同, 保护的动作情况也不同。在系统运行方式和故障类型变化的情况下, 利用改进的电压电流保护对系统进行仿真, 并分析保护动作机理。图4和图5为系统分别在两相故障、三相故障下的并网点电流电压输出特性以及电流电压保护

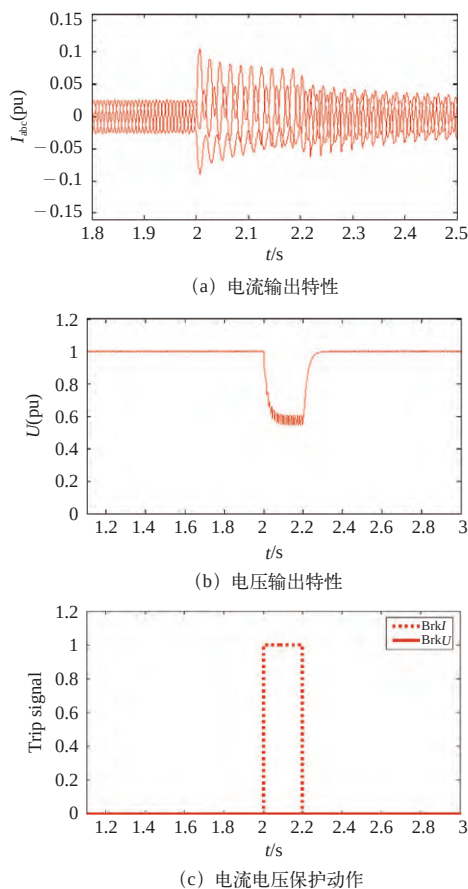


图4 两相故障下的故障仿真图

的动作仿真图。故障发生时刻为 2.0 s, 持续时间 0.2 s。

从图4中的风电场送出线的电流图可以看出, 故障电流达 0.1 (pu), 电流保护动作, 随后电流值衰减, 由于电流保护采用的是改进的低电压保持保护, 保护跳闸, 可靠动作。从电压跌落图可知, 故障期间电压跌落为 0.5 (pu) 左右, 大于 0.2 (pu), 而且在故障恢复过程, 满足 LVRT 的要求, 所以多段式电压保护没有跳闸。仿真和上述理论分析一致, 验证了提出理论的准确性, 提高了风电场故障保护的可靠性。

由图5可知, 三相故障时, 电压跌落很大, 几乎使电压为零, 由于电压下降有过渡过程, 所以多段式电压保护延迟 0.02 s 跳闸, 所以在故障时刻 2 s 有很大的故障电流, 使电流保护启动, 之后故障电流迅速衰减, 由于采用了改进的低电压保持的电流保护, 保护一直动作。很好地满足了电网可

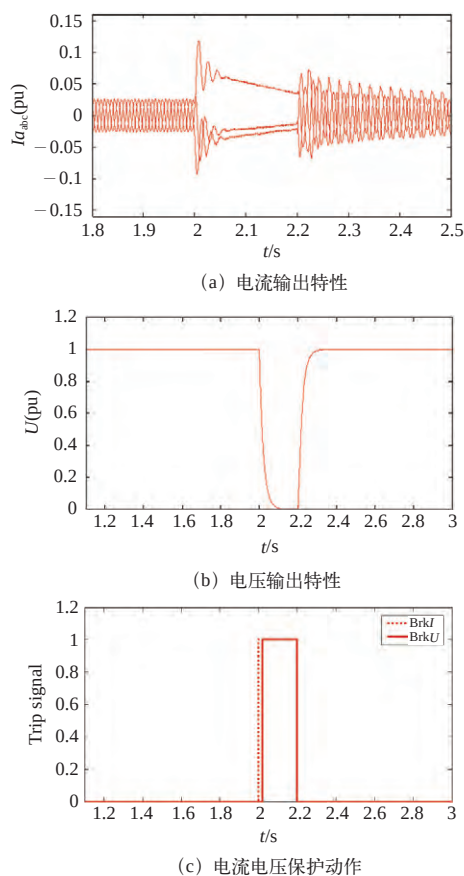


图5 三相故障下的故障仿真

靠、稳定运行的要求。

本文只考虑了阶段式电流保护和满足LVRT的要求,在实际运行情况下,必须与其他的保护相配合,例如过电压保护、差动保护和低频保护等,这样才能使具有LVRT能力的风电机组在电网中更好地发挥其作用。

结束语

利用主动型的Crowbar电路实现风机的LVRT功能,在满足我国LVRT能力的规定下,提出改进阶段式电流保护和多段式电压保护,并给出保护的结构框架,利用PSCAD软件对含LVRT能力的风电机组系统进行仿真。在故障情况下,虽然故

障电流衰减,但是当电流保护被启动后,电压降落,低压保持的延时电流保护依然可以可靠地动作,而多段式电压保护保证了在图1中的要求风机不间断运行区域中,风机不脱网运行。仿真的结果与理论分析相一致,为研究与具有LVRT能力的风电机组并网相配合的继电保护提供了更为可靠的理论依据,是对传统保护技术的优化与拓展。

参考文献

- [1] 王飞,郑日红,段建东.基于双馈机组风电场并网后的自适应保护[J].电机与控制应用,2012,39(3):57-61.
- [2] 何世恩,董新洲.大规模风电机组脱网原因分析及对策[J].电力系统保护与控制,2012,40(1):131-137.
- [3] 贺益康,周鹏.变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J].电工技术学报,2009,24(9):140-146.
- [4] 王宾,董新洲,潘贞存,等.含风电接入配电系统电压跌落传播特性分析[J].电力系统自动化,2011,35(10):53-58.
- [5] 撤奥洋,张哲,尹项根,等.双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J].电工技术学报,2012,27(4):233-239.
- [6] 成红兵,袁炜,周伟波,等.基于DBR的双馈风力机组低电压穿越方案设计[J].电力系统保护与控制,2013,41(13):122-128.
- [7] 郑斌,张新燕.双馈感应式风力发电系统低压穿越能力仿真研究[J].电机技术,2011(2):38-41.
- [8] 张学广,徐殿国.电网对称故障下基于active crowbar双馈风机控制[J].电机与控制学报,2009,13(1):99-103.

(收稿日期:2015-01-10) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告