

[文章编号] 1003—4684(2020)04-0029-05

风电场集中接入对集电线电流保护的影响

宇 卫, 涂玲英, 陈 健

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 分析双馈型风机的短路电流特性, 针对典型的风力发电厂, 结合仿真分析了风电机组大规模接入电网对现有电流保护造成的影响, 并给出了相应的电流保护整定策略。

[关键词] 电流保护; 故障特性; 保护整定; 风力发电机

[中图分类号] O413 [文献标识码] A

近年来, 以风电为代表的可再生能源发电技术受到了广泛关注和高度重视, 在国家强有力的政策支持下, 我国风力发电正在向大规模、高集中开发方向快速发展^[1]。

风电场集中接入电网后, 由于其复杂的短路电流特性和剧烈变化的运行方式, 会影响传统电流保护性能: 发生故障时, 风机提供的短路电流包含特殊的暂态分量和序分量; 双馈型风机的撬棒保护动作时, 风厂内部的运行方式和短路电流分布会产生较大的变化。针对这些问题, 传统的电流保护整定需要做出相应的改进从而满足应用要求^[2]。

以典型风电场为例, 建立了双馈型风机的短路计算模型, 提出了传统电流保护整定计算模式在风电场集中接入时存在的问题。针对这些问题给出了相应的整定调整策略, 并结合仿真, 验证了这些调整策略的正确性。

1 双馈型风电机组短路电流特性

撬棒保护是双馈型风电机组提高低电压穿越能力的主要措施, 撬棒保护的動作行为直接影响双馈型风电机组的短路电流特性。因此, 双馈型风电机组的故障特性研究应分别从考虑撬棒保护动作和计及励磁调节特性影响这两个方面进行。

1.1 考虑撬棒电路动作的 DFIG 短路计算模型

在发生近区严重故障时, 撬棒保护会动作, DFIG 定子电流中除含有稳态基频分量和衰减直流分量外, 还有角频率为 ω_r 的转速频率电流分量。然而, 在实际短路计算中, 主要关心的是基频分量^[3]。

文献[4]推导出了发生故障时, 撬棒保护动作后双馈型风机故障相电流正、负序分量等效计算模型, 等效电路见图 1。

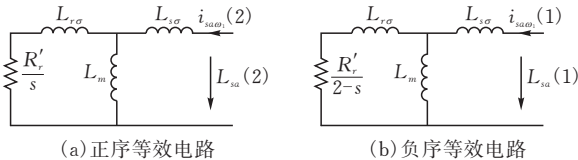


图 1 撬棒保护动作后双馈型风机故障相正负序等值电路

图 1 中, s 为转差率, $I_{\min-end}$ 为定子漏抗, $I_{set}^{\parallel} = K_{rel}^{\parallel} \cdot I_{max}$ 为转子漏抗, I_{set}^{\parallel} 为定转子互感, K_{rel}^{\parallel} 为转子绕组等效电阻。

从图 1 可以看出, 实际上, DFIG 稳态基频分量的等效计算模型即为异步电动机的等效模型。故撬棒保护动作瞬间, 双馈型风机对于电网而言由发电机变为电动机, 即由故障前的产生电流成为故障后的吸收电流。对电流保护而言, 它改变了电流流向, 有可能会引起电流保护的工作异常。

1.2 计及励磁调节特性的 DFIG 短路计算模型

远区非严重故障情况下, 双馈型风机的转子绕组仍由变频器进行励磁。此时双馈型风机定子绕组故障电流特性与传统同步发电机的故障电流特性相比存在较大的区别。文献[5]通过研究双馈风电机组定子电力的故障特性, 指出定子绕组故障电流中只有衰减直流分量和强制基频分量, 而不含衰减的基频分量。强制基频分量的大小则由电网电压跌落深度和低电压穿越运行期间所采用的控制策略共同决定。

[收稿日期] 2019—12—27

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601399)

[第一作者] 宇 卫(1986—), 男, 四川成都人, 工学硕士, 湖北工业大学副教授, 研究方向为电气工程

[通信作者] 陈 健(1995—), 男, 湖北黄冈人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为电气工程

目前,DFIG 在电网故障条件下的低电压穿越策略包括多种,主要有平衡 DFIG 总输出电流的控制策略^[6],恒定的 DFIG 电磁转矩的控制策略^[7],恒定的 DFIG 系统输出有功功率的控制策略^[8],恒定的 DFIG 发电系统无功功率的控制策略^[9]。本文中,将采用平衡的 DFIG 总输出电流控制策略来建立其短路计算模型。当双馈型风机撬棒保护没有动作时,在这一控制策略下,双馈型风机等效为受控电流源模型,仅向外部提供正序电流。DFIG 的正序等效电路见图 2。

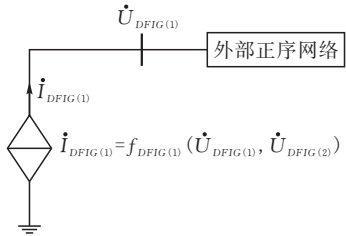


图 2 DFIG 正序等效电路

2 原有集电线电流保护的整定方法

典型的双馈型风厂见图 3,单台双馈型风机的容量为 1.5 MW,风机通过箱式变压器升压至 35 kV,再通过主变升压至 110 kV,与外部电网相连。风电场集电线电压等级为 35 kV,并且线路通常不长,故通常在电网侧配置有两段式电流保护(图 3 中 M 处)。

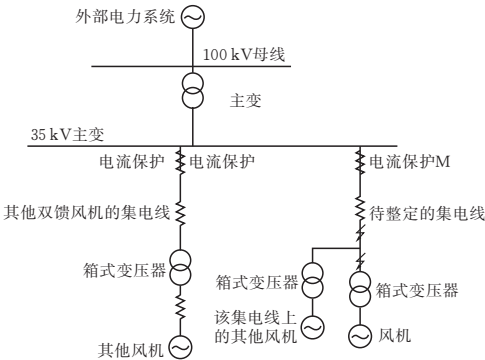


图 3 典型风厂示意图

2.1 原有集电线电流保护 I 段整定方法

在图 3 中,待整定集电线末端 f_1 处发生故障时,根据原有电流保护整定原则,在保护安装处 M 点的电流保护 I 段定值按保本线故障具有足够灵敏度整定,即有:

I_{set}^I = \frac{I_{min-end}}{K_{sen}^I} \tag{1}

式中: I_{set}^I 为电流保护 I 段整定值; K_{sen}^I 为 I 段灵敏度系数,典型值取 1.5; $I_{min-end}$ 为故障时,流过保护的最小短路电流。

在计算 $I_{min-end}$ 时,原有整定方法采用的计算条

件为:图 2 中 f_1 处发生两相短路;系统采取最小运行方式;所有风电机组退出运行。

2.2 原有集电线电流保护 II 段整定方法

在图 3 中,在待整定集电线的箱式变压器低压侧 f_2 处发生故障时,根据原有电流保护整定原则,在保护安装处 M 点的电流保护 II 段定值按躲过集电线最近处箱式变压器低压侧最大短路电流整定,即有:

I_{set}^{II} = K_{rel}^{II} \cdot I_{max} \tag{2}

式中: I_{set}^{II} 为电流保护 II 段整定值; K_{rel}^{II} 为 II 段可靠系数,典型值取 1.5; I_{max} 为故障时,流过保护的最大短路电流。

在计算 I_{max} 时,原有整定方法采用的计算条件为:图 3 中 f_2 处发生三相短路;系统采用最大运行方式;所有风电机组投入运行。

3 原有集电线电流保护整定方法存在的主要问题和调整策略

3.1 原有电流保护 I 段整定方法存在的主要问题和调整策略

3.1.1 原有电流保护 I 段整定计算存在的主要问题 由式(1)可知,原有电流保护 I 段整定的关键在于正确计算集电线末端最小短路电流 $I_{min-end}$ 。原有整定方法中,将所有风机退出运行,只考虑系统提供的短路电流。这一整定方法最大的问题在于没有考虑双馈型风机撬棒保护动作所导致的分流作用。

3.1.2 集电线电流保护 I 段整定方法的调整策略

在双馈型机组的撬棒保护不动作时,风机为有源支路,故可采用原有整定方法来计算 $I_{min-end}$ 。但当发生近区短路故障时,可能导致风电机组撬棒保护动作,此时双馈型风电机组励磁回路经撬棒电阻短接,失去励磁,其等值电路类似为异步电动机,会对系统的短路电流有分流作用,从而导致流过待整定集电线上的短路电流减小(图 4)。

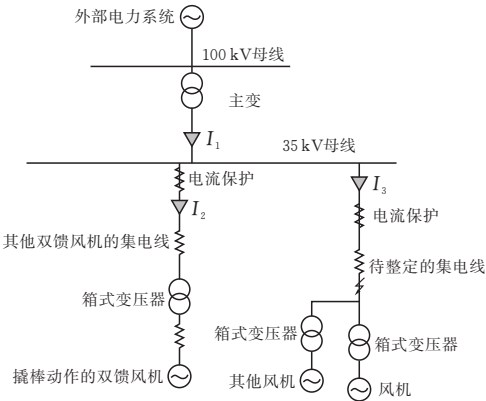


图 4 电流保护 I 段整定等效示意图

在图 4、图 5 中,待整定集电线末端 f 点发生两

相短路时, I_1 为系统侧向风厂提供的短路电流, I_2 为双馈型机组撬棒保护动作导致的分流作用, I_4 为故障集电线上的短路电流。

根据以上分析,为了正确计算 $I_{\min-\text{end}}$,调整后的计算条件应该是:集电线末端 f 处发生两相短路;系统最小运行方式;其他集电线上的双馈型风电机组全部投入运行,并且撬棒保护动作。

3.2 原有电流保护 II 段整定方法存在的主要问题和调整策略

3.2.1 原有电流保护 II 段整定计算存在的主要问题 由式(2)可知,在电流保护 II 段整定中,关键是要正确计算流过待整定集电线的最大短路电流 I_{\max} 。原有的整定计算方法在计算 I_{\max} 时,将风机看作传统发电机的电压源串接内阻抗的等效电源,故计算条件为所有风机全部投入运行。根据前述分析,发生故障时,双馈型风机的短路计算模型与传统发电机的等效模型有很大的不同;如果双馈型风机的撬棒保护动作了,那么此时双馈型风机等效为异步电动机;如果双馈型风机的撬棒保护没有动作,那么此时双馈型风机等效为受控电流源模型,向外提供短路电流。故原有整定方法的计算条件不一定适用于风电场集中时集电线电流保护 II 段的整定。

3.2.2 集电线电流保护 II 段整定方法的调整策略

现以电流保护 II 段整定等效示意图(图 5)为例,详细分析电网不同计算条件对短路电流 I_{\max} 的影响。

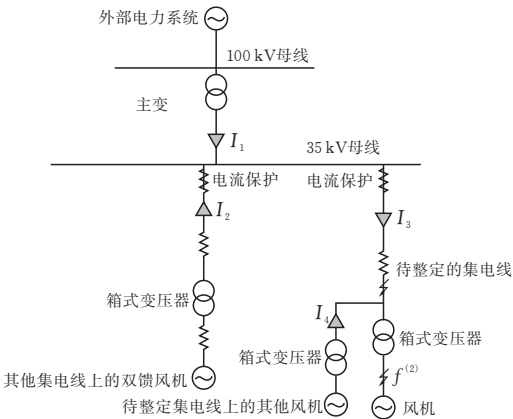


图 5 电流保护 II 段整定等效示意图

在图 5 中,待整定集电线箱变低压侧 f 处发生三相短路故障, I_1 为系统侧向风厂提供的短路电流, I_2 为其他集电线风电机组提供的短路电流, I_3 为故障集电线上的短路电流, I_4 为待整定集电线上其他双馈型风机提供的短路电流。

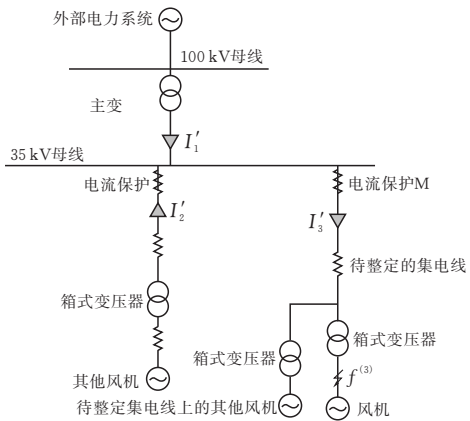
计算 I_{\max} 也即计算 I_3 的最大值。由图 5 可知, I_3 主要受 I_4 、 I_2 和 I_1 影响。其中, I_4 由待整定集电线其他并联风电机组的运行方式决定; I_2 由其他集

电线风电机组的运行方式决定; I_1 由系统的运行方式决定。下面分别对这三个方面进行分析。

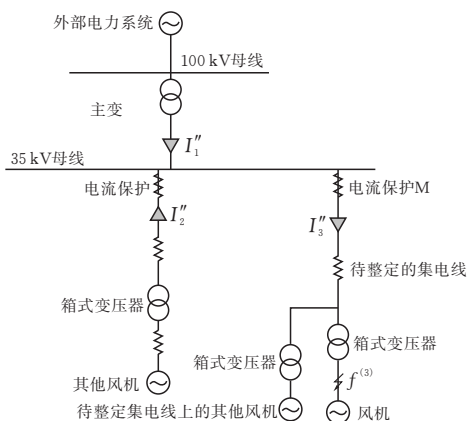
1)待整定集电线其他并联风电机组的运行方式 在原有的整定方法中,待整定集电线上并联的其他风电机组的运行方式为全部投入运行。但考虑到双馈型风电机组的撬棒保护动作情况后,这些双馈型风机可以等效为异步电动机,此时这些双馈型风机由提供短路电流转变为吸收短路电流,从而减小短路阻抗并增大 I_3 。故原有整定方法中待整定集电线上其他并联风电机组的运行方式应调整:双馈型风机撬棒保护设置为动作动态。

2)其他集电线风电机组的运行方式 在原有的整定方法中,其他集电线上的风电机组的运行方式为全部投入运行,此时其他集电线上的风机提供的短路电流 I_2 最大,也同时增大 I_3 。故原有整定方法中其他集电线风电机组的运行方式不需要作调整。

3)外部系统运行方式 对图 5 使用叠加定理,有图 6。



(a) 只有风机提供短路电流时的叠加等效图



(b) 只有系统提供短路电流时的叠加等效图

图 6 考虑系统运行方式时的叠加等效图

在图 6 中,根据叠加定理有:

$$I_3 = I_3' + I_3'' \tag{3}$$

$$I_3'' = I_1'' - I_2'' \tag{4}$$

$$I'_2 = I'_1 + I'_3 \tag{5}$$

式中： I'_3 为只考虑其他集电线的风机提供的短路电流时，流过故障集电线的短路电流； I''_3 为只考虑系统侧提供短路电流时，流过集电线的短路电流。式(4) 中， I''_1 为只考虑系统侧提供的短路电流时，流过故障集电线的短路电流， I''_2 为流向其他集电线风机的短路电流。式(5) 中， I'_1 为只考虑其他集电线的风机提供的短路电流时，往系统侧的分流， I'_3 为流向待整定集电线的短路电流。

由式(3)可以看出， I_3 由 I'_3 和 I''_3 两部分组成，当 I'_3 和 I''_3 同时最大时， I_3 最大。

为了使 I'_3 最大，必须使其他集电线上的风机提供的短路电流往系统侧的分流 I'_1 最小，由电路理论可知，当系统侧的等效阻抗最大时，流向系统侧的分流 I'_1 就越小，此时 I'_3 就越大，故此时系统应为最小运行方式。

为了使 I''_3 最大，必须使系统侧提供的短路电流 I'_1 最大，此时系统应为最大运行方式。

由以上分析可知， I'_3 和 I''_3 无法同时取最大值。当系统为强系统并且风电场容量较小时， I_3 受系统侧提供的短路电流的影响要大一些，系统应选择最大运行方式；当系统为弱系统并且风电场容量较大时，此时 I_3 受风机提供的短路电流的影响要大一些，系统应该选择最小运行方式来减少分流作用。故在整定集电线电流保护Ⅱ段时，需要考虑系统强弱和风厂容量从而确定系统的运行方式。

综上所述，集电线电流保护Ⅱ段整定方法应调整为：集电线箱变低压侧发生三相短路；待整定集电线上其他并联的双馈型风机撬棒保护动作；其他集电线上的风电机组全部投入运行；系统运行方式的选取需考虑系统强弱和风电场容量这两个因素。

4 仿真实验验证

为了验证对集电线原有电流保护的问题分析和调整策略的正确性，以 PSCAD/EMTDC 为仿真平台，构建图 2 所示的典型风电场的仿真模型。其中，系统参数为：基准电压 110 kV，基准容量 100 MVA，最大运行方式下，正序阻抗 0.1693 p.u.，零序阻抗 0.3286 p.u.，最小运行方式下，正序阻抗 0.175 p.u.，零序阻抗 0.355 p.u.；风电厂的参数为：单台风机额定容量 1.5 MW，单台箱式变压器的额定容量为 1600 kVA，变比 0.69/36.75 kV，联结组别为 Yd，漏电抗 6.44%，主变额定容量 100000 kVA，变比 36.75/115 kV，联结组别为 YY，漏电抗 10.6%；待整定集电线阻抗 0.243 p.u.。

4.1 电流保护Ⅰ段仿真验证

在构建的仿真模型中，在待整定集电线末端 f 点发生 AB 两相短路时，分别对以下两种整定方法做仿真分析， $I_{\min-\text{end}}$ 仿真结果见表 1。表 1 中的 Δ 表示按照调整后的整定方法得到的 $I_{\min-\text{end}}$ 与原有整定方法的 $I_{\min-\text{end}}$ 比较的变化率。

1)原有整定方法：系统最小运行方式，所有风机退出运行；

2)调整后的整定方法：系统最小运行方式，双馈型风机投入运行且撬棒保护动作。

表 1 电流保护Ⅰ段仿真结果

| 整定方法 | I_a /kA | I_b /kA | $I_{\min-\text{end}}$ /kA | Δ /% |
|------|-----------|-----------|---------------------------|-------------|
| a | 2.576 | 2.577 | 2.576 | 0 |
| b | 2.503 | 2.507 | 2.503 | -2.8 |

表 1 的仿真结果表明调整后的整定方法得到的 $I_{\min-\text{end}}$ 相比于原有方法得到的 $I_{\min-\text{end}}$ 减小了 2.8%，减小的幅度不大，故集电线电流保护Ⅰ段整定可以忽略风电机组的影响，按原有整定方法来计算。

4.2 电流保护Ⅱ段仿真验证

构建的仿真模型中，在待整定集电线箱式变压器低压侧 f 点发生三相短路时，分别对以下整定方法进行仿真， I_{\max} 仿真结果见表 2。表 2 中的 Δ 表示按照调整后的方法得到的 I_{\max} 相比于原有整定方法的 I_{\max} 的变化率。

1)原有整定方法：系统最大运行方式，所有风机投入运行；

2)修正整定方法 1：系统最大运行方式，待整定集电线上其他并联的双馈型风机撬棒保护动作，其他集电线上的风机全部退出运行；

3)修正整定方法 2：系统最小运行方式，待整定集电线上其他并联的双馈型风机撬棒保护动作，其他集电线上的风机全部退出运行；

4)修正整定方法 3：系统最大运行方式，待整定集电线上其他并联的双馈型风机撬棒保护动作，其他集电线上的风机全部投入运行；

5)修正整定方法 4：系统最小运行方式，待整定集电线上其他并联的双馈型风机全部保护动作，其他集电线上的风机全部投入运行。

表 2 电流保护Ⅱ段仿真结果

| 整定方法 | I_a /kA | I_b /kA | I_c /kA | I_{\max} /kA | Δ /% |
|------|-----------|-----------|-----------|----------------|-------------|
| 1) | 0.361 | 0.361 | 0.361 | 0.361 | 0 |
| 2) | 0.337 | 0.337 | 0.337 | 0.337 | -6.65 |
| 3) | 0.318 | 0.318 | 0.318 | 0.318 | -11.91 |
| 4) | 0.422 | 0.422 | 0.422 | 0.422 | 16.90 |
| 5) | 0.450 | 0.450 | 0.450 | 0.450 | 24.65 |

表 2 的仿真结果表明:调整后的整定方法 2)和方法 3)相比于方法 1)(即原有方法), I_{\max} 减小了,这两种整定方法中,其他集电线上的风机退出了运行,这也就证明了为了得到更大的 I_{\max} ,需要将其其他集电线上的风机全部投入运行;整定方法 4)相比于方法 1), I_{\max} 增大了 16.9%,这说明待整定集电线上的双馈型风机的撬棒动作导致减小短路阻抗的作用十分明显,这也证明了前述理论分析的正确性;整定方法 5)相比于方法 1), I_{\max} 增大了 24.65%,与方法 3)相比,具有更大的增幅,说明在其他条件相同的情况下,系统选择最小运行方式时的 I_{\max} 要大于系统选择最大运行方式时的 I_{\max} ,这进一步说明了系统的运行方式的选择应综合考虑系统强弱和风电场容量这两个因素的影响。在对集电线电流保护Ⅱ段进行整定时,对于弱系统、大容量风厂的电网结构,系统运行方式应选择最小运行方式,对于强系统、小容量风厂的电网结构,系统运行方式应选择最大运行方式。

5 结论

双馈风电机组复杂的故障电流特性对风电场集电线电流保护有重要影响,将严重影响风电场和电网的安全稳定运行。基于此,本文首先分析了双馈风电机组的故障电流特性,并建立了相应的计算模型。在此基础上,分析了风电场集电线传统电流保护存在的缺陷,并提出了适用于双馈风电场集电线的电流保护整定新方案。主要结论如下:

- 1)撬棒保护对双馈风电场机组故障电流有重要影响,传统同步发电机的次暂态电势串接次暂态阻抗模型已不适用,需要建立考虑撬棒保护动作的 DFIG 模型和计及励磁调节特性影响的 DFIG 模型;
- 2)适用双馈风电场集电线电流保护与传统电流保护整定原则有较大区别:与系统的运行方式和风场内部的运行方式等因素有关。在电流保护Ⅰ段进行整定计算时,需要将 DFIG 的撬棒保护设为动作后状态;而在电流保护Ⅱ段整定计算时,系统运行方式的选择要考虑系统强弱和风场容量等因素的影响,待整定集电线上其他并联的双馈型风机的撬棒保护应设定为动作状态,其他集电线上的风机应全部投入运行。

3)仿真结果证明了调整后的集电线电流保护整定方法的正确性。调整后的整定方法提高了风电场继电保护性能,对电网和风电场的安全稳定运行有较大帮助。

[参 考 文 献]

[1] 秦云甫. 我国风电产业发展问题分析与解决途径[D]. 北京:华北电力大学,2012.

[2] 孙景钊,李永丽,李盛伟,等. 含分布式电源配电网保护方案[J]. 电力系统自动化,2009(1): 81-84.

[3] Xiangping Kong, Zhe Zhang, Xianggen Yin. Fault current study of wind turbine driven DFIG with crowbar protection[J]. Elektrotehniški vestnik, 2014, 81(12): 57-63.

[4] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1-10.

[5] Fan Xiao, Zhe Zhang and Xianggen Yin. Fault current characteristics of the dfig under asymmetrical fault conditions[J]. Energies, 2015,8(10):1071-1092.

[6] Zheng Yanwen, Li Yongdong, Chai Jianyun. Research on control strategy for doubly-fed generation system under unbalanced voltage condition[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(15):89-93.

[7] Si Zhe Chen, Norbert C. Cheung, Ka Chung Wong, et al. Integral sliding-mode direct torque control of doubly-fed induction generators under unbalanced grid voltage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 356-368.

[8] WANG Hongsheng, ZHANG Wei, HU Jiabing. A control strategy for doubly-fed induction generator wind turbines under asymmetrical grid voltage conditions caused by faults[J]. Automation of Electric Power Systems,2010, 34(4):97-102.

[9] HU Jiabing, HE Yikang, WANG Hongsheng. Coordinated control of grid- and rotor- side converters of doubly-fed induction generator under unbalanced network voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 97-104.

[10] Baran M E, Ismail E M. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(4):1757-1764.