

超导故障限流器对并网异步发电机运行状态的影响

以简单的异步发电机并网模型为研究对象,根据戴维南等效原理,简化故障网络,推导出使用电阻型和饱和铁心型故障限流器时戴维南等效电压源电压的数学表达式,然后详尽分析了故障时异步发电机的暂态过程。基于PSCAD/EMTDC软件搭建仿真模型,仿真了电网故障时电阻型和饱和铁心型超导故障限流器对异步发电机端电压、电磁转矩和转差率的影响。仿真结果表明,故障限流器有效减小了短路电流,故障时投入相同的限流阻抗,电阻型超导故障限流器比饱和铁心型超导故障限流器更能提高异步发电机的暂态稳定性。

钱滢锋 梅 军 姚 磊 郑建勇/东南大学电气工程学院



钱滢锋/硕士研究生

关键词/Keywords

超导故障限流器·
异步发电机·
暂态稳定·
转差率·

随着电力需求的不断增长,电力系统的规模不断扩大,电网的短路电流水平不断提高。短路电流水平已经逼近断路器的遮断容量,给电力系统的安全稳定运行带来严重隐患。因此采取有效的短路限流措施越来越有必要。

为了限制不断增长的短路电流,出现了多种短路限流措施,但是传统的限流措施都存在一定的局限性^[1-2]。故障限流器在系统正常运行时不投入阻抗,对系统几乎没有影响,而系统发生短路故障时迅速投入阻抗限制短路电流,是一种理想方案。故障限流器根据不同的原理、特性及结构可以分成多种类型^[3-5]。超导故障限流器从结构上主要分为电阻型、桥路型、饱和铁心型和磁屏蔽型等。其中,电阻型超导故障限流器在限流时投入电阻,其他几种类型的超导限流器在故障时主要投入电感以限制短路电流^[6-8]。

目前,故障限流器对电网暂态稳定

的研究主要建立在单机无穷大系统,利用系统功角特性对同步发电机的功角稳定进行研究。文献[9]从故障限流器对系统功角曲线的影响方面做了一些基本的分析;文献[10]推导了具有故障限流器(FCL)系统的极限切除角的严格数学表达式;文献[11]主要分析了不同限流比、故障类型和故障切除时间下的系统暂态稳定特性;文献[12]分析了不对称故障情况下,FCL对暂态稳定的影响。当故障限流器在配电网中应用时,不但可以有效限制短路电流,减小电压跌落^[13],而且对其他线路中并网的异步发电机运行状态有较大影响。

本文以一个简单的异步发电机并网模型为例,根据戴维南等效原理,简化故障网络,推导出使用电阻型及饱和铁心型故障限流器时戴维南等效电压源电压的数学表达式,对比分析了电阻型及饱和铁心型超导故障限流器对电网短路电流和并网异步发电机端电压、电磁转矩和转差率的影响。最后基于专业电力仿真软件PSCAD/EMTDC对异步发电机的运行状态进行仿真分析。

电阻型和饱和铁心型超导故障限流器工作原理

电阻型和饱和铁心型超导故障限流器原理图如图1所示。电阻型超导故障限流器的工作原理^[14]是利用超导体通过大电流时的超导态/非超导态转变特性。正常运行时,超导线圈处于超导态,阻值几乎为零,对系统没有影响;系统故障

时, 短路电流远远大于正常工作电流, 流过超导线圈的电流大于其临界电流, 超导体失超, 变成高阻抗, 限制短路电流。

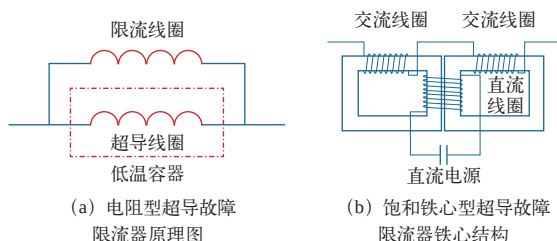


图1 超导故障限流器结构原理图

1982年, Raju等人提出了饱和铁心型超导故障限流器^[15], 其主要由日字型铁心、两个交流线圈和直流线圈组成, 直流线圈为铁心提供直流偏磁, 交流线圈串联至电网中。电网正常运行时, 直流线圈电流使铁心处于深度饱和; 交流线圈电抗值较小, 对系统没有影响。电网故障时, 直流线圈迅速放电, 铁心退出饱和; 交流线圈电抗增大, 限制短路电流。

简单的异步发电机并网模型

1. 并网模型分析

一个简单的系统模型如图2所示, 其用来分析故障限流器对并网异步发电机运行状态的影响。系统模型有4条10 kV线路, 每条10 kV线路的首端装有一台故障限流器, 异步发电机通过变压器接入10 kV母线, 10 kV母线通过变压器并入220 kV电网。

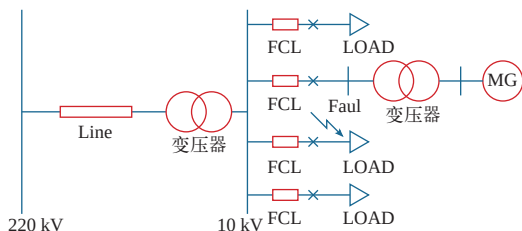
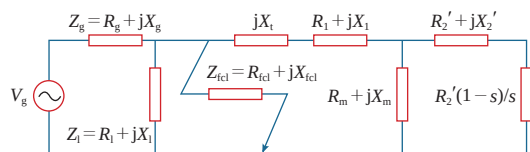


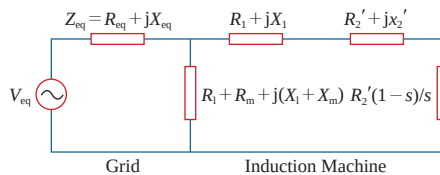
图2 异步发电机并网简化模型

故障电网的等效电路和异步发电机的T型等效电路如图3a所示。图3a中, V_g 为电网电压; Z_g 为电网内阻抗; Z_l 为负载等效阻抗; Z_{fcl} 为故障限流器在系统故障时投入的阻抗; jX_t 为变压器的等效阻抗; $R_1 + jX_1$ 为异步发电机定子等效阻抗; $R_2' + jX_2'$ 为转子等效阻抗; $R_2'(1-s)/s$ 为机械负载等效电阻。

根据戴维南等效原理将故障电网等效为电压源和阻抗串联, 并将异步发电机的等效电路进一步简化, 可以得到图3b所示的简化等效电路图。图3b中, V_{eq} 为故障电网等效电压源电压; Z_{eq} 为故障电网等效阻抗。



(a) 故障电网和异步发电机的等效电路



(b) 简化的等效电路

图3 故障电网和异步发电机的等效电路

故障电网的戴维南等效电压源电压为

$$\overline{V_{eq}} = V_g \frac{Z_{fcl} \| Z_l}{Z_{fcl} \| Z_l + Z_g} = V_{eq} e^{j\theta_{th}} \quad (1)$$

式中, θ_{th} 为等效电压源电压相角。

由于负荷的等效阻抗远大于故障限流器在短路时投入的阻抗, 即 $Z_l \gg Z_{fcl}$, 因此 $Z_{fcl} \| Z_l \approx Z_{fcl}$, 式

(1) 可以简化为

$$\overline{V_{eq}} = V_g \frac{R_{fcl} + jX_{fcl}}{(R_{fcl} + R_g) + j(X_g + X_{fcl})} = V_{eq} e^{j\theta_{th}} \quad (2)$$

$$|\overline{V_{eq}}| = V_{eq} = V_g \frac{\sqrt{R_{fcl}^2 + X_{fcl}^2}}{\sqrt{(R_{fcl} + R_g)^2 + (X_g + X_{fcl})^2}} \quad (3)$$

式中, R_{fcl} 、 X_{fcl} 分别为故障限流器投入的等效电阻和电抗; R_g 、 X_g 分别为电网的内电阻和内电抗。

由式(2)、式(3)可以看出, 当系统发生短路故障时, 故障电网的等效电压源电压主要由故障限流器的限流阻抗决定。限流阻抗越大, 故障电网的等效电压源电压越大。

故障电网的戴维南等效阻抗为

$$Z_{eq} = Z_t + Z_{fcl} \| Z_g = R_{eq} + jX_{eq} \quad (4)$$

式中, R_{eq} 、 X_{eq} 分别为故障电网的戴维南等效电阻和电抗; Z_t 为变压器等效阻抗。

由于电网的内电抗远大于内电阻, 即 $R_g \ll X_g$,

因此可以将 R_g 忽略,将等式进一步简化为

$$\overline{V}_{eq} = V_g \frac{R_{fcl} + jX_{fcl}}{R_{fcl} + j(X_g + X_{fcl})} = V_{eq} e^{j\theta_{th}} \quad (5)$$

$$|\overline{V}_{eq}| = V_{eq} = V_g \frac{\sqrt{R_{fcl}^2 + X_{fcl}^2}}{\sqrt{R_{fcl}^2 + (X_g + X_{fcl})^2}} \quad (6)$$

短路电流的有效值可以近似为

$$I_{fcl} \approx \frac{V_g}{\sqrt{R_{fcl}^2 + (X_g + X_{fcl})^2}} \quad (7)$$

对于电阻型超导故障限流器,由于电网故障时限流阻抗主要为电阻,因此将 X_{fcl} 忽略,故障电网等效电压源电压及短路电流分别为

$$|\overline{V}_{eq}|_R = V_{eqR} = V_g \frac{R_{fcl}}{\sqrt{R_{fcl}^2 + X_g^2}} \quad (8)$$

$$I_{fclR} \approx \frac{V_g}{\sqrt{R_{fcl}^2 + X_g^2}} \quad (9)$$

式中, V_{eqR} 、 I_{fclR} 分别为使用电阻型超导故障限流器时故障电网等效电压源电压和短路电流。

对于饱和铁心型超导故障限流器,电网故障时限流阻抗主要为电抗,因此将 R_{fcl} 忽略,故障电网等效电压源电压和短路电流分别为

$$|\overline{V}_{eq}|_X = V_{eqX} = V_g \frac{X_{fcl}}{\sqrt{(X_g + X_{fcl})^2}} \quad (10)$$

$$I_{fclX} \approx \frac{V_g}{\sqrt{(X_g + X_{fcl})^2}} \quad (11)$$

式中, V_{eqX} 、 I_{fclX} 分别为使用饱和铁心型超导故障限流器时故障电网等效电压源电压和短路电流。

由式(8)~式(11)可以看出,投入相同阻抗的电阻型和饱和铁心型超导故障限流器,使用电阻型超导故障限流器时短路电流更大,故障电网的等效电压源电压更高。

2. 故障时异步发电机暂态过程分析

当异步电动机转子的转速高于同步转速时,定子绕组向电网输出电功率,此时电动机变为发电机运行状态^[16]。异步发电机的电磁转矩公式为

$$T = \frac{m_1 p U_1^2}{\omega_1} \frac{\frac{r_2'}{s}}{(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \quad (12)$$

当供电电网的频率和电压为常数,并且发电机的电阻和漏抗可以认为不变时,则异步发电机的电磁转矩仅与转差率有关。

图4为异步发电机的 $T-S$ 曲线。 $T-S$ 曲线代表了异步发电机正常运行时,电磁转矩与转差率的关系。当原动机的机械转矩为 T_m 时,它与这条曲线有两个交点A和B,而第二个交点B的运行状态并不稳定,因此异步发电机工作在A点。

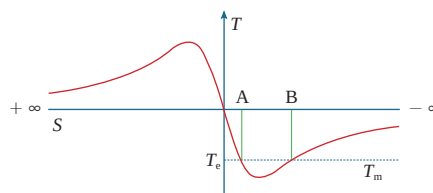


图4 异步发电机的电磁转矩

异步发电机正常运行时,转差率 s 较小,因此 $\frac{r_2'}{s} \gg Z_{eq}$,可以认为异步发电机的端电压近似地等于故障电网的等效电压源电压,异步发电机的电磁转矩与等效电压源电压成正比。

根据角速度增量公式 $\Delta\omega = \int_0^t \frac{(T - T_m)}{J} dt$,异步发电机在故障过程中转差率的变化主要由故障时的电磁转矩及故障持续时间决定。

故障发生时,如果故障限流器没有投入限流阻抗,短路故障将导致母线电压及异步发电机的端电压和电磁转矩迅速降低,此时异步发电机的机械转矩还没来得及变化,转子加速,转差率上升。如果异步发电机的转差率超过极限转差率B,则异步发电机将无法回到稳定运行状态。

如果发生短路故障时,故障限流器迅速投入阻抗,提高了母线电压及异步发电机的端电压和电磁转矩,然而此时异步发电机的电磁转矩仍然小于正常运行时的电磁转矩,异步发电机的转子将加速,最终达到稳定状态。

仿真分析

使用PSCAD/EMTDC软件搭建模型进行仿真分析,异步发电机通过变压器接入10 kV母线,在2.5 s时,10 kV母线的一路出线发生三相短路故障,故障持续时间为1 s,各元件参数配置如下。

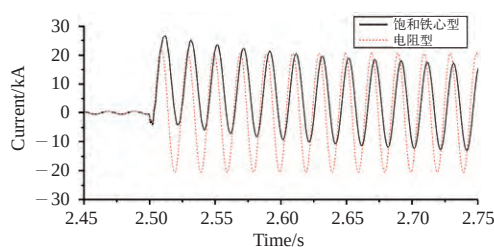
电源。线电压为220 kV, 频率为50 Hz, 电源初相角为 0° , 无内阻, 相当于无穷大系统。

架空线。220 kV线路全长为200 km, 阻抗值为 $6.935 + j84.673$; 10 kV线路全长为10 km, 阻抗值为 $4.5 + j3.5$ 。

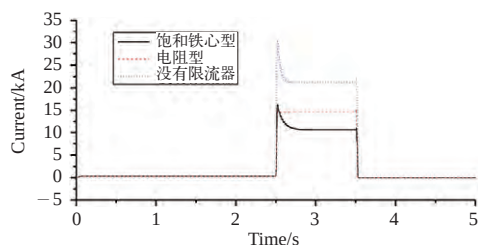
异步发电机。额定电压为690 V, 额定容量为600 kW。

1. 电阻型和饱和铁心型超导故障限流器对短路电流的影响

根据计算, 故障电网的 X_g 归算到10 kV侧约为 0.3Ω , 为了对比分析电阻型和饱和铁心型超导故障限流器对短路电流及异步发电机的影响, 分别在故障时投入 0.3Ω 的电阻和电抗。图5为10 kV线路首端发生三相短路时, 使用不同类型故障限流器时的短路电流瞬时值和短路电流有效值。



(a) 使用不同类型故障限流器时的短路电流



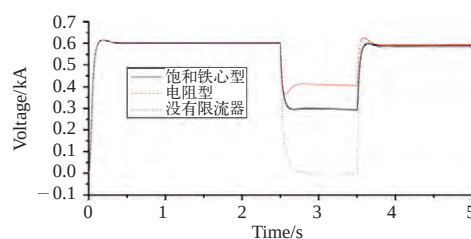
(b) 使用不同类型故障限流器时的故障电流有效值

图5 短路电流

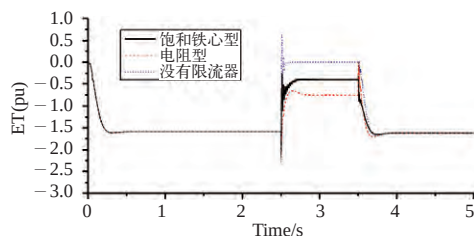
从图5中可以看出, 使用电阻型超导故障限流器时, 稳态短路电流大于使用饱和铁心型超导故障限流器时的稳态短路电流, 然而由于限流电阻的作用, 短路电流的非周期分量迅速衰减, 第一个波峰的峰值较小。因此使用电阻型超导故障限流器时, 短路冲击电流较小。

2. 电阻型和饱和铁心型超导故障限流器对异步发电机运行状态的影响

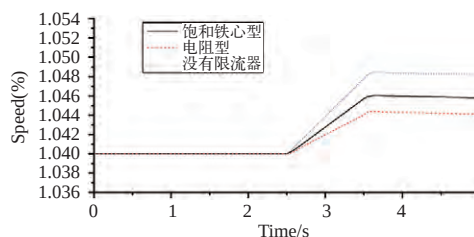
图6为电网故障时, 异步发电机的端电压、电磁转矩和转差率波动情况。



(a) 故障限流器对异步发电机端电压的影响



(b) 故障限流器对异步发电机电磁转矩的影响



(c) 故障限流器对异步发电机转差率的影响

图6 故障限流器对并网异步发电机运行状态的影响

从图6a中可以看出, 如果没有使用故障限流器, 故障时异步发电机的端电压立刻跌落; 而使用电阻型超导故障限流器时, 异步发电机的端电压较高。限流阻抗的投入有效提高了故障时异步发电机的端电压, 但故障限流器的限流阻抗值不宜过大, 以免影响低电压保护设备运行。

从图6b中可以看出, 没有使用故障限流器时, 由于异步发电机端电压的跌落, 异步发电机的电磁转矩立刻跌落; 而使用故障限流器后, 故障限流器提高了异步发电机端电压, 从而提高了异步发电机的电磁转矩。使用电阻型超导故障限流器时, 异步发电机的电磁转矩比使用饱和铁心型超导故障限流器时更高。

当发生短路故障时, 由于异步发电机输入的机械转矩不能立刻变化, 而异步发电机的电磁转矩立刻跌落, 因此异步发电机的转差率上升。从图6c中可以看出, 使用电阻型超导故障限流器时, 异步发电机的转差率波动较小。

故障限流器在发生短路故障时有效减小了线路电流,并提高了母线电压。由于母线电压的升高,增大了故障时异步发电机的电磁转矩,异步发电机转差率的波动减小,有效提高了异步发电机的暂态稳定。使用电阻型超导故障限流器时,短路冲击电流较小,而稳态短路电流较大,异步发电机端电压和电磁转矩较高,转差率变化较小。

参考文献

- [7] 刘尚, 张志丰, 刘昕, 等. 一种新型桥式高温超导限流器的研究 [J]. 电气应用, 2005, 24 (11): 33-36.
- [8] 曹正建, 龚伟志, 张敬因, 等. 主动型饱和铁心超导限流器限流阻抗特性与动态仿真 [J]. 电气应用, 2009, 28 (5): 20-23.
- [9] Sjostrom M, Cherkaoui R, Dutoit B. Enhancement of power system transient stability using superconducting fault current limiters [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, 9 (2): 1328-1330.
- [10] 赵彩宏, 田立军, 邹贵彬, 等. FCL对电力系统暂态稳定性影响的机理分析与仿真 [J]. 电力自动化设备, 2001, 21 (2): 14-17.
- [11] 刘洪顺, 李庆民, 徐亮, 等. 氧化锌避雷器式故障限流器对电力系统暂态稳定的影响 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (8): 51-54.
- [12] 顾雪平, 杨智龙. 不对称短路时电抗型故障限流器对暂态稳定性的影响 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (9): 86-92.
- [13] 孙树敏, 徐亮, 刘洪顺. ZnO避雷器式故障限流器在配电网的应用研究 [J]. 中国电力, 2008, 41 (5): 70-74.
- [14] 金建勋. 高温超导体及其强电应用技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [15] Raju B P, Parton K C, Bartram T C. A current limiting device using superconducting D.C. bias applications and prospects [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101 (9): 3173-3177.
- [16] 胡虔生, 胡敏强. 电机学 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.

(收稿日期: 2014-05-12) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告