

氧化锌避雷器式故障限流器对 电力系统暂态稳定的影响

刘洪顺¹, 李庆民¹, 徐 亮¹, 刘玉田¹, 孙树敏²

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力研究院, 山东 济南 250021)

摘要: 介绍了氧化锌避雷器式故障限流器的工作原理和分析模型, 针对安装该种故障限流器的单机-无穷大系统, 研究了不同工况下发电机的功角特性曲线, 利用等面积定则详细分析了其暂态物理过程。在此基础上定义了一系列定量描述暂态稳定的指标, 分别针对有无故障限流器 2 种情况, 应用 Matlab 构建了单机和多机系统的仿真模型, 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。理论分析和仿真结果都表明: 安装氧化锌避雷器式故障限流器, 可有效抑制摇摆曲线的振荡幅度并缩短衰减周期, 延长系统的极限切除时间, 提高系统的暂态稳定能力。

关键词: 故障限流器; 氧化锌避雷器; 暂态稳定; 功角特性

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)08-0051-04

随着电能需求的快速增长, 电网的规模和容量不断扩大, 导致电力系统的短路电流水平日益升高。在电网中装设故障限流器(FCL)是较为理想的解决方案^[1-7], 文章的重点就是通过理论分析与仿真, 研究氧化锌避雷器(MOA)式 FCL 对电力系统暂态稳定特性的影响^[8-14]。

1 氧化锌避雷器式 FCL 简介

氧化锌避雷器式 FCL 的基本电路拓扑见图 1^[12]。

系统正常工作时, 电抗器(L_c+L)与电容器 C 发生串联谐振; 系统发生短路故障时, 随着故障电流的增加, 电容器上的电压迅速增大, 利用氧化锌避雷器的非线性电阻特性将电容器短路, 从而将电抗器 L 串入系统, 达到限制故障电流的目的, 同时也将电容器上的过电压限制在避雷器的残压水平。同时, 触发可控间隙 G 动作, 减少了避雷器的吸能; 这里, L_c 用于限制间隙的放电电流。旁路开关 S 作为避雷器的后备保护和可控间隙的主保护, 可避免间隙长时间的燃弧烧损。旁路开关在此只需完成快速合闸的功能, 可采用快速开关。

上述限流拓扑的实际应用, 需要根据系统的具体情况, 综合分析相关技术特性与经济特性, 并采用优化设计措施保证 FCL 的运行可靠性。相应的技术措施包括: 故障信息的检测与快速识别, 并联避雷器组的选型与设计, 可控放电间隙设计及其放电电流的抑制, 避雷器参数(参考电压和残压等)、可控间隙击穿

电压和快速开关动作时间之间的配合等。鉴于重点研究安装 FCL 后对电力系统暂态稳定特性的影响, 同时受篇幅所限, 这里不再给出与限流器具体结构设计有关的研究内容。

2 具有 FCL 的系统暂态物理过程分析

为便于分析氧化锌避雷器式 FCL 对电力系统暂态稳定的影响, 这里选用如图 2 所示的单机-无穷大系统模型。正常运行时, 发电机经变压器和双回线路向无穷大系统送电, 在 2 条出线的始端分别装有 1 台氧化锌避雷器式 FCL。

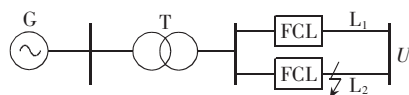


图 2 单机-无穷大系统模型

Fig.2 Model of one-machine infinite-bus system

当在线路 L_2 始端发生三相短路故障时, 发电机的功角特性将经过一系列的暂态变化过程, 如图 3 所示, 具体可以分为 4 个阶段: 发电机正常运行(P_I)、故障初始且 FCL 未动作(P_{II})、故障中且 FCL 已动作(P_{III})以及故障切除后(P_{IV})。

系统正常运行时, 发电机向无穷大系统输送的有功功率为 P_0 , 原动机输出的机械功率 $P_T=P_0$, a 点表示

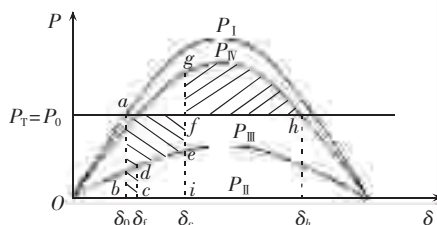


图 3 具有故障限流器的系统功角曲线

Fig.3 Power-angle curves of system with FCL

发电机的正常运行点。发生三相短路后,功率特性立即降为 P_{II} ,但由于转子的惯性,转子角度不会立即变化,其相对于无穷大系统母线电压 U 的角度 δ_0 仍保持不变。因此,发电机的运行点由 a 点突然变至 b 点,输出功率显著减小,而 P_T 并不变,故产生了较大的过剩功率。在过剩转矩作用下,发电机转子将加速,其相对角度 δ 逐渐增大,使运行点由 b 点向 c 点移动。FCL 在此时动作,功率特性立即变为 P_{III} ,工作点也相应地变化到 d 点,对应的功角为 δ_f 。当工作点沿功率曲线 P_{III} 移动到 e 点时故障被切除,功率特性立即变为 P_{IV} ,发电机的运行点也从 e 点突然变至 g 点,对应的功角为 δ_e 。此时发电机输出功率比原动机的机械功率大,使转子受到制动,转子速度逐渐减慢。但此时的速度已经大于同步转速,所以相对角度还要继续增大,工作点将沿 P_{IV} 向 h 点移动,直到转子恢复到同步转速。

故障发生后,从起始功角 δ_0 到故障切除瞬间所对应的功角 δ_e 这段时间里,发电机转子受到过剩转矩的作用而加速,因此,装有 FCL 的系统的加速面积为 S_{abcdef} ;若不安装 FCL,则在故障切除前,系统工作点将沿 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow i \rightarrow e \rightarrow f$ 移动,其加速面积为 $S_{abcief} > S_{abcdef}$ 。由此可见,FCL 对系统暂态稳定性影响的实质,是减少了系统的加速面积,即减小了发电机转子在系统发生故障期间过剩的动能积累,从而对系统的暂态稳定产生积极的影响。

若限流器具有高限流比 α (一般指限流电抗较大),则可能使系统永不失稳。在限流器动作后,若发电机输出功率极限足够大并超过 P_T ,这不仅使得系统在故障后的加速面积 S_a 得以减小,同时还能获得减速面积 S_d ,如图 4 所示。当 S_d 不小于 S_a 时,即使系统永久不切除故障,发电机也能与无穷大系统恢复同步,即系统能保持稳定的极限切除时间为无限大。

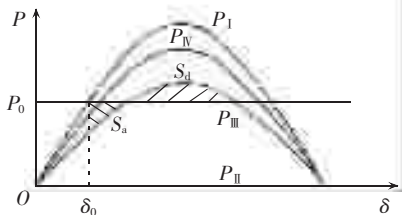


图 4 安装高限流比限流器的系统功角曲线

Fig.4 Power-angle curves of system with high α FCL

由上述理论分析可知,在输电线路中安装氧化锌避雷器式 FCL,将有利于系统的暂态稳定,下文中通过仿真模型对此予以佐证。

3 仿真分析

仿真模型分别针对单机-无穷大系统和多机系统,利用 Matlab 实施。为便于定量描述暂态稳定的具体特征,这里给出几个参数定义。

限流比 α :系统预期短路电流 I_f 与限流后实际电

流 I_f' 的比值。限流比越大,限流效果越明显。

动稳定电流 i_p :短路电流的瞬时最大值。

最大摇摆角 $\delta_{\max}$:摇摆曲线振荡的最大幅值。

衰减比率 γ_δ :摇摆曲线第 5 个波峰和最大摇摆角的比值。

极限切除时间 t_{clim} :能够保持系统暂态稳定,短路故障的极限切除时间。

这里以 $\delta_{\max}$ 、 γ_δ 、 t_{clim} 等作为评判指标,分析氧化锌避雷器式 FCL 对电力系统暂态稳定的影响。 $\delta_{\max}$ 越小, γ_δ 越大, t_{clim} 越长,系统保持暂态稳定的能力越强。反之,系统保持暂态稳定的能力越差。

3.1 单机-无穷大系统

系统模型如图 2 所示,相关的仿真参数为:发电机额定容量 $1000 \text{ MV} \cdot \text{A}$,额定功率 800 MW ,内电抗 $X_d = 1.0$ (标么值,下同), $X_d' = 0.2$, $X_d'' = 0.15$,惯性时间常数 $\tau_j = 4 \text{ s}$,阻尼系数 $D = 0.001$,发电机定子电阻 $R_s = 0.00285$ 。系统频率 $f = 50 \text{ Hz}$,变压器等值电抗 $X_T = 0.1$,传输线电抗 $X_{L1} = X_{L2} = 0.71$ 。

3.1.1 不同限流比下系统的暂态稳定特性

以线路出口处发生三相短路为例,仿真结果如图 5 所示。随着 FCL 限流比的增大,动稳定电流随之减小,最大摇摆角也减小,而极限切除时间和衰减比率增大,即增大氧化锌避雷器式 FCL 的限流比,可使系统更快速地恢复稳态,增强系统的暂态稳定能力。

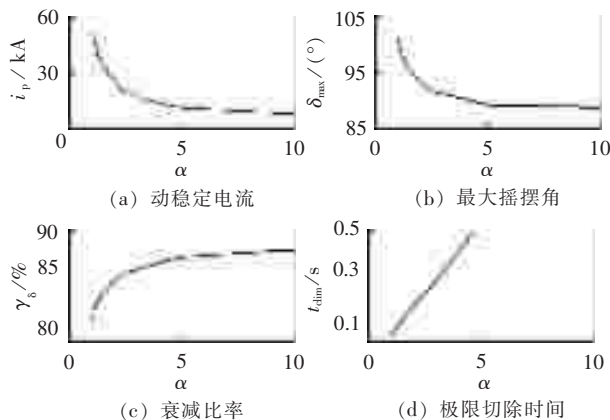


图 5 不同限流比下 FCL 对系统暂态稳定的影响

Fig.5 Influences of FCL on transient stability of power system for different current limiting ratios

随着限流比的增大(增加限流器的限流电抗值),发电机和无穷大系统间的联系电抗随着限流电抗值的增大而减小,提高了故障时发电机的输出功率,可有效减小系统的加速面积,对系统的暂态稳定性就越有利。由图 5(d)可知,当限流比大于一定数值时,即使永久不切除故障,发电机也不会失去稳定。这是因为,线路中串入足够大的限流电抗时,发电机的输出功率极限大于机械功率,减速面积大于加速面积,使系统具有很强的保持暂态稳定的能力。实际限流比不可能无限制增大,受到限流电抗造价的制约,需综合暂态稳定特性和经济性进行优化设计。



3.1.2 不同切除时间时系统的暂态稳定特性

系统的暂态稳定特性与故障切除时间直接相关,切除时间愈长,功角的相对变化愈大。以线路出口处发生三相短路为例,针对不同故障切除时间的仿真结果如图 6 所示(实线表示无 FCL,虚线表示有 FCL;图 7、9 同)。

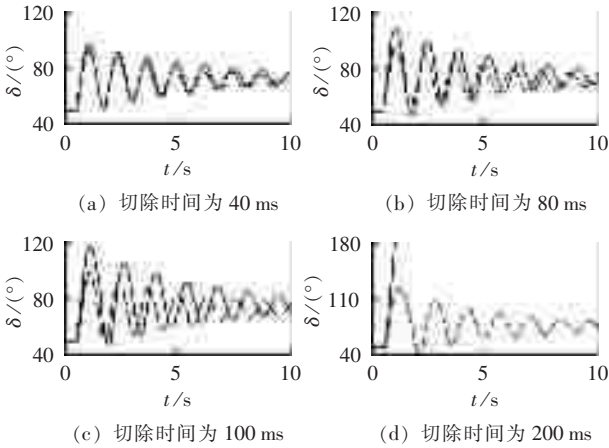


图 6 发电机的功角摇摆曲线
Fig.6 Power-angle swing curves for different fault clearance times

由图 6(a)(b)(c)可知,相对无 FCL 的系统,安装氧化锌避雷器式 FCL(限流比为 2)的系统能更快地恢复到稳定状态。由图 6(d)可知,当切除时间为 200ms 时,无 FCL 的系统中发电机已经与无穷大系统失去同步,而安装了 FCL 的系统仍能到达稳定状态。

因此,安装氧化锌避雷器式 FCL 可增大系统的极限切除角,为继电保护的正确动作提供更大的时间裕度,并改善系统在短路故障下的暂态功角稳定性,提高系统的暂态稳定裕度。

3.1.3 不同短路形式下系统的暂态稳定特性

以线路出口处发生短路为例,针对短路形式的仿真结果如图 7 所示。可明显看出,在第 1 个摇摆周期内,安装 FCL 的系统的最大摇摆角 $\delta_{\max}$ 比没有 FCL 的系统明显减小,从而有利于系统的暂态稳定。

由仿真结果可见,对于安装氧化锌避雷器式 FCL

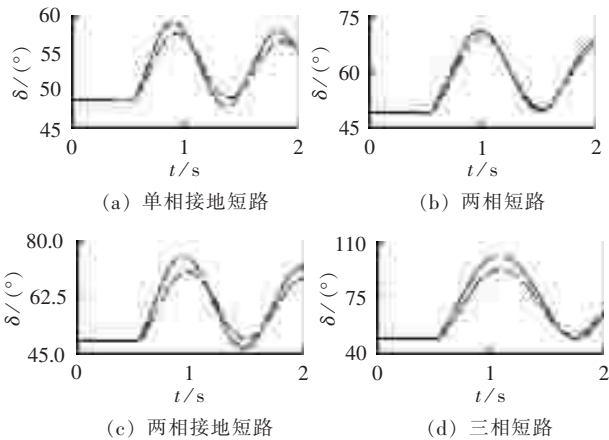


图 7 不同短路形式下的功角摇摆曲线
Fig.7 Power-angle swing curves for different short-circuit faults

的系统,即使遭受最严重的三相短路或其他短路故障,FCL 都能快速动作,从而减小发电机原动机机械功率和输出电磁功率之间的差值,限制功角的相对变化,提高系统的暂态稳定性。

3.2 多机系统

系统仿真模型如图 8 所示,相关参数为(未标单位的均为标么值):发电机组 G_1 为平衡节点,容量为 $1200 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $f=50 \text{ Hz}$, $X_d=1.0$, $X_d'=0.2$, $X_d''=0.15$, $R_s=2.85 \times 10^{-3}$;发电机组 G_2 和 G_3 为 PV 型节点,容量为 $1000 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $f=50 \text{ Hz}$, $X_d=1.0$, $X_d'=0.2$, $X_d''=0.15$, $R_s=2.85 \times 10^{-3}$;变压器 $S_{T1}=1200 \text{ MV} \cdot \text{A}$,变比 $10.5/121$, $R_T=0.002$, $X_T=0.1$;变压器 $S_{T2}=S_{T3}=1000 \text{ MV} \cdot \text{A}$,变比 $10.5/121$, $R_T=0.002$, $X_T=0.1$;FCL 为限流比为 2 的氧化锌避雷器式 FCL;系统基准容量为 $1000 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

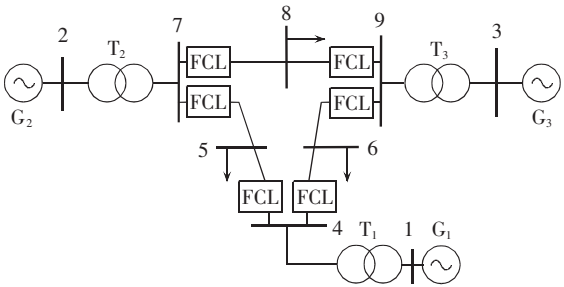


图 8 安装 FCL 的 3 机 9 节点系统
Fig.8 Three-machine 9-bus system with FCL

设 $t=0.5 \text{ s}$ 时连接母线 7 和 8 的线路出口处发生三相短路故障, $t=0.61 \text{ s}$ 时切除故障,仿真结果见图 9。可看出,无 FCL 的多机系统,发电机组 G_2 的功角相对于平衡节点 G_1 持续增加直至失去同步。安装 FCL 的多机系统,功角振荡幅度减小,仍能很快恢复稳定。进一步的仿真结果表明,与单机-无穷大系统类似,在多机系统中安装氧化锌避雷器式 FCL,能抑制摇摆曲线的振荡幅度并缩短衰减周期,延长系统的极限切除时间,可提高系统的暂态稳定能力。

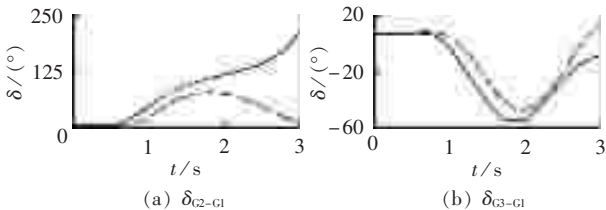


图 9 各发电机组相对于平衡节点的摇摆曲线
Fig.9 Power-angle swing curves of G_2 and G_3 relative to G_1

4 结论

- a. 安装氧化锌避雷器式 FCL,可明显改善电力系统在短路故障下的暂态稳定性,提高其暂态稳定裕度。随着限流比的提高,系统的暂态稳定能力也会相应增强。
- b. 限流器对系统的综合影响还涉及到断路器

开合能力、继电保护整定、谐振与操作过电压等方面,尚有待深入研究。

参考文献:

- [1] 刘焕柳,李兴源,刘俊勇,等. 高温超导故障限流器的数学模型及其数字仿真[J]. 中国电机工程学报,1996,16(4):250-253.
LIU Huan-liu,LI Xing-yuan,LIU Jun-yong,et al. Model and simulation of a high TC superconducting fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE,1996,16(4):250-253.
- [2] 王付胜,刘小宁. 饱和铁心型高温超导故障限流器数学模型的分析与参数设计[J]. 中国电机工程学报,2003,23(8):135-139.
WANG Fu-sheng,LIU Xiao-ning. Model analysis of a high temperature superconducting fault current limiter and its parameter designment[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(8):135-139.
- [3] 叶林,林良真. 超导故障限流器在电力系统的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(7):1-4.
YE Lin,LIN Liang-zhen. Superconducting fault current limiter applications in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(7):1-4.
- [4] 孙晶,宗曦华,何砚发,等. 感应屏蔽型高温超导故障电流限制器模型机研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(10):81-84.
SUN Jing,ZONG Xi-hua,HE Yan-fa,et al. Study on inductive high-TC superconducting fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(10):81-84.
- [5] SJOSTROM M,CHERKAoui R,DUTOIT B. Enhancement of power system transient stability using superconducting fault current limiter[J]. IEEE Trans Applied Superconductivity,1999,9(2):328-330.
- [6] YAGAMI M,SHIBATA S,MURATA T,et al. Improvement of power system transient stability by superconducting fault current limiter[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Yokohama,Japan:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc,2002:359-364.
- [7] 张绪红,周有庆,吴桂清,等. 饱和铁心型超导限流器的仿真设计方法[J]. 电网技术,2004,28(6):49-52.
ZHANG Xu-hong,ZHOU You-qing,WU Gui-qing,et al. A new design method for saturated core superconducting fault current limiter[J]. Power System Technology,2004,28(6):49-52.
- [8] 肖茂友,李庆民,姜杰,等. 两种经济型故障限流器的工作特性比较[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(4):71-75.
XIAO Mao-you,LI Qing-min,LOU Jie,et al. Comparative analysis on the operating performance of two economical type

- fault current limiters[J]. Proceedings of the EPSA,2005,17(4):71-75.
- [9] 郑敏,李兴源,刘俊勇,等. 具有串联补偿作用的新型故障限流器的拓扑结构和仿真[J]. 中国电机工程学报,1999,19(6):52-55.
ZHENG Min,LI Xing-yuan,LIU Jun-yong,et al. Topology and simulation of a new fault current limiter with series compensation[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(6):52-55.
 - [10] 赵中原,吕征宇,江道灼. 新型固态限流器三相主电路拓扑及控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(12):42-46.
ZHAO Zhong-yuan,LÜ Zheng-yu,JIANG Dao-zhuo. Study on three-phase main circuit topology and control strategy for a new-type solid-state current limiter[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(12):42-46.
 - [11] 陈刚,江道灼,蔡永华,等. 具有旁路电感的新型固态限流器的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):200-205.
CHEN Gang,JIANG Dao-zhuo,CAI Yong-hua,et al. Study on a novel solid state fault current limiter with bypass reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(7):200-205.
 - [12] HENRY S,BALDWIN T. Improvement of power quality by means of fault current limitation [C]//Proceedings of the Thirty-sixth Southeastern Symposium on System Theory. Piscataway, USA:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc,2004:280-284.
 - [13] 钱家骊,关永刚,徐国政,等. 整流式故障电流限制器对高压断路器开合能力的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(10):1309-1312.
QIAN Jia-li,GUAN Yong-gang,XU Guo-zheng,et al. Influence on switching capability of HV circuit breakers by employing rectifier type fault current limiter[J]. J Tsinghua Univ:Sci & Tech,2005,45(10):1309-1312.
 - [14] CALIXTE E,YOKOMIZU Y,SHIMIZU H,et al. Interrupting condition imposed on a circuit breaker connected with fault current limiter[J]. International Journal of Power and Energy Systems,2002,25(2):75-81.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

刘洪顺(1981-),男,山东青岛人,博士研究生,主要从事电力系统经济型故障限流器的研究工作(E-mail:hongshun1981@mail.sdu.edu.cn);

李庆民(1968-),男,山东菏泽人,教授,博士研究生导师,主要从事新型高压电器方面的科学研究工作(E-mail:lqmee@sdu.edu.cn)。

Influence of MOA-based FCL on power system transient stability

LIU Hong-shun¹,LI Qing-min¹,XU Liang¹,LIU Yu-tian¹,SUN Shu-min²

(1. Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. EPRI of Shandong, Ji'nan 250021, China)

Abstract: The operating principle and analytical model of MOA (Metal Oxide Arrester)-based FCL (Fault Current Limiter) are presented. For the typical one-machine infinite-bus system with FCL, the power-angle characteristics of generator are studied in various operation conditions, and its transient physical process is analyzed in detail using Equal Area Criterion, based on which a series of indexes are defined to describe transient stability quantitatively. Simulation models of one-machine and multi-machine systems with and without FCL are constructed with Matlab, based on which the transient stability characteristics of power systems are studied for different current-limiting factors, fault types and fault clearance times. Both theoretical analysis and simulation results show that, the installation of MOA-based FCL can effectively suppress the oscillatory amplitudes of swing curves, reduce the decaying period, extend the critical clearance time and hence improve the transient stability of power system.

This project is supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (Q2004F03) and Young Scientists Foundation of Shandong Province (2005BS01011).

Key words: fault current limiter; MOA; transient stability; power-angle characteristics