

# 超导故障限流器对电力系统 暂态稳定性的影响分析

顾雪平, 杨智龙

(华北电力大学 电气与电子工程学院 电力工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 根据超导故障限流器(SFCL)失超后表现出的阻抗特性, 可将SFCL分为2类: 电感型和电阻型。针对单机无穷大系统, 推导出了在输电线路不同位置发生短路故障时, 投入超导故障限流器后的总转移阻抗和发电机的输出功率表达式。从功角特性曲线上分别分析了电感型和电阻型超导故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响情况, 从数学上进行了证明, 并从物理上进行了解释。最后用改进欧拉法编程, 对接入SFCL的电力系统进行了暂态稳定时域仿真研究。

**关键词:** 超导故障限流器; 电感型; 电阻型; 暂态稳定

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2007)04-0022-07

## Influence Analysis of Transient Stability for Superconducting Fault Current Limiter on Power System

Gu Xueping, Yang Zhilong

(Department of Electrical Engineering, College of Electrical and Electronic Engineering,  
North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

**Abstract** According to the characteristics of superconducting fault current limiters(SFCL), the SFCL can be divided into two types: inductor type and resistor type. The total transfer impedance and the generator power-output expressions are deduced after introducing SFCL when short circuit faults occurs on different locations of a transmission line in a single machine to infinite-busbar system. From the view of the power angle relationship, the effects of inductor type and resistor type SFCL on power system transient stability are analyzed, a mathematical proof and a physical explanation are also given. The improved Euler algorithm is used for the time-domain simulation of transient stability to proving the analytical results.

**Key words:** superconducting fault current limiter; inductor type; resistor type; transient stability

### 0 引言

随着电网容量的逐年增加, 短路电流水平不断提高, 电力系统中原有的电气设备, 如发电机、变压器、断路器等, 将要承受越来越大的短路电流冲击。为了提高电网运行的安全可靠, 减小短路电流给电气设

备带来的危害, 延长电气设备寿命, 必须采取有效的限流措施, 而传统的限流措施实现起来又有一定的局限性<sup>[1, 2]</sup>。随着20世纪80年代后期高温超导材料的发展, 用高温超导体做成超导限流器具有其特有的优越性, 它能够集检测、触发和限流于一身, 是电力系统的理想限流装置<sup>[3, 4]</sup>。

**收稿日期:** 2007-07-02

**作者简介:** 顾雪平(1964-), 男, 河北行唐人, 华北电力大学教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定评估与控制, 电力系统安全防御和系统恢复, 智能技术在电力系统中的应用;

杨智龙(1982-), 男, 河北邯郸人, 华北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。

高温超导故障限流器 (SFCL) 能够在液氮 (温度保持在 77 K) 的环境下应用于电力系统。正常运行时, 超导体不表现任何阻抗, 还具有完全的抗磁性, 装置对电网的影响几乎为零; 当电力系统发生短路故障时, 由于短路电流超过超导体的临界电流, 使超导体迅速失超而表现一个很大的阻抗, 从而将短路电流限制在一个很低的水平。

超导故障限流器按照不同的原理、结构和特性, 可进行多种分类<sup>[5-6]</sup>, 但按其失超后表现出的阻抗特性可分为电阻型和电感型 2 大类。当这两类超导限流器应用于输电线路时, 对电力系统的暂态稳定性会有不同的影响。

目前, 超导故障限流器在电力系统中应用的研究大都集中在限制短路电流效果上, 对暂态稳定影响方面的研究还比较少。文献[7, 8]仅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[9]利用等面积准则推导出了输电线路一端具有传统限流器的极限切除角的数学表达式, 从极限切除角方面解释了电感型限流器对暂态稳定性影响的机理; 文献[10]分析了电阻型固态限流器对暂态稳定性的影响情况。而在输电线路的不同位置发生故障时, 限流器对电力系统暂态稳定性的影响情况并没有分析。本文不仅分析了不同位置发生故障时, SFCL 对暂态稳定性的影响情况, 还推导出了系统故障时投入超导限流器后的总转移阻抗和发电机输出的功率表达式, 从数学上证明了电感型和电阻型超导故障限流器对暂态稳定性的影响情况, 并且从物理上进行了解释, 最后通过暂态稳定的时域仿真结果进行了验证。

## 1 系统模型

以一个简单的单机对无穷大系统为例, 分析超导故障限流器安装在输电线路时对电力系统的暂态影响。正常运行时发电机经升压变压器和双回线路向无限大系统送电, 并在其中一回线上加装 SFCL, 系统结构如图 1 所示。

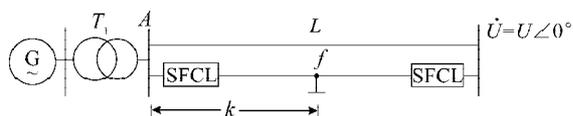


图 1 具有 SFCL 的单机对无穷大系统

Fig. 1 Infinite-busbar system of single-machine with SFCL

图 1 中发电机电抗为  $x'_d$ , 变压器电抗为  $x_{T1}$ , 输电线路电抗为  $x_L$ , 线路长度为  $L$ , 引入一个百分比  $k$  ( $0 < k < 1$ ), 输电线路其中一回线距离  $A$  母线  $kL$  处发生三相短路故障。

本文采用的系统参数如下。发电机:  $P_{GN}=240$  MW,

$U_N=10.5$  kV,  $f=50$  Hz,  $\cos\psi=0.80$ ,  $x'_d=0.30$ ,  $T_j=6$  s; 变压器 ( $T_1$ ):  $S_N=300$  MVA, 变比为 10.5 kV/242 kV,  $U_s$  (%) = 14; 线路阻抗为 0.42  $\Omega$ /km, 长度 230 km; 负荷:  $P_{01}=220$  MW,  $U=220$  kV,  $\cos\psi_{01}=0.80$ 。

取  $S_B=220$  MVA,  $U_{B(220)}=220$  kV, 则各元件的标么值参数为:  $E'=1.32$ ,  $U=1$ ,  $x'_d=0.266$ ,  $x_{T1}=0.125$ ,  $x_L=0.439$ ,  $T_j=8.18$  s。投入的 SFCL 阻抗值按标么值进行分析。

### 1.1 正常运行时

超导故障限流器表现为零阻抗, 发电机的电动势与无穷大系统间的电抗及发电机发出的电磁功率表达式<sup>[11]</sup>分别为:

$$x_{1\Sigma} = x'_d + x_{T1} + \frac{x_L}{2}, \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{E'U}{x_{1\Sigma}} \sin\delta_0. \quad (2)$$

### 1.2 故障切除后

保护动作, 切除故障线路后, 系统间的总电抗及发电机发出的电磁功率表达式分别为:

$$x_{3\Sigma} = x'_d + x_{T1} + x_L, \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{E'U}{x_{3\Sigma}} \sin\delta_0. \quad (4)$$

## 2 电型超导故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响

当其中一回线路发生三相短路故障时, 故障线路上的 SFCL 由于受到短路冲击电流而失超, 表现为大的电抗  $x$ , 其等值电路如图 2 所示。

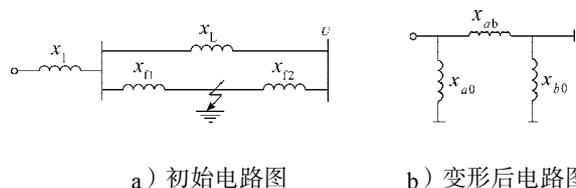


图 2 电感型 SFCL 失超后等值电路

Fig. 2 Equivalent circuits with inductor type SFCL

图中:

$$x_1 = x'_d + x_{T1}, \quad (5)$$

$$x_{T1} = x + kx_L, \quad (6)$$

$$x_{T2} = x + (1-k)x_L. \quad (7)$$

从而, 发电机的电动势与无穷大系统间的总转移电抗及发电机发出的电磁功率表达式分别为:

$$x_{2\Sigma} = x_{ab} = \frac{A_1 x + A_0}{x + kx_L}, \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{E'U}{x_{2\Sigma}} \sin \delta \quad (9)$$

其中:  $A_1=x_1+x_L$ ;  $A_0=x_L (kx_L+kx_1+x_L)$ 。

**2.1 故障位置一定, 超导限流器投入的电抗值变化**

为便于分析比较在输电线路某一位置发生故障时, 加入电感型 SFCL 后对暂态稳定的影响情况, 把  $k$  看作常数,  $x_{2\Sigma}$  看作是以  $x$  为自变量的函数, 即  $x_{2\Sigma}=f(x)$ ,  $x$  为零时相当于没有投入 SFCL 的情况。通过观察自变量  $x$  增大时,  $x_{2\Sigma}$  是增大还是减小, 就可以判断出加入电感型 SFCL 后对暂态稳定影响是有利还是不利。判断  $x_{2\Sigma}$  的变化情况, 只要求出  $x_{2\Sigma}$  对  $x$  的导数是大于零还是小于零即可。经化简整理, 得:

$$\frac{dx_{2\Sigma}}{dx} = \frac{-x_1x_L}{(x+kx_L)^2} < 0 \quad (10)$$

可以看出  $x_{2\Sigma}$  是一个关于  $x$  单调递减函数, 所以, 不管在输电线路的任何位置发生故障, 只要投入电感型 SFCL, 都能使总电抗  $x_{2\Sigma}$  减小。由于  $P_2$  的幅值与  $x_{2\Sigma}$  成反比, 从而使  $P_2$  的幅值增大, 由等面积定则<sup>[1]</sup>可知, 故障后线路两端由于电抗的投入而导致加速面积减小, 这将对暂态稳定产生有利影响, 并且投入电感型 SFCL 的电抗值越大, 对暂态稳定越有利。由转移电抗表达式还可以看出  $P_2$  的幅值不会无限增大, 最终会稳定于  $P_3$  的幅值, 相当于故障线路切除后的情况。

图 3 示出了  $k$  分别为 0、0.25、0.75 和 1 时, 总电抗与投入电抗的关系曲线  $x_{2\Sigma}=f(x)$ 。从图 3 可以看出投入电感型 SFCL 后总电抗的变化情况, 还可以看出故障位置向后移动, 总电抗会变小, 从而更有利于暂态稳定。

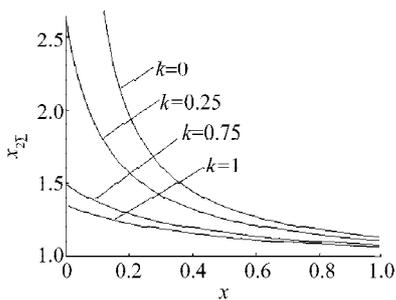


图 3 总电抗  $x_{2\Sigma}$  与投入电抗  $x$  的关系曲线  
Fig. 3 Relation curve between  $x_{2\Sigma}$  and  $x$

图 4 为发电机在不同运行状态下的功角特性曲线, 由等面积定则可以清楚地分析投入电感型 SFCL 后对暂态稳定的影响情况。

图 4 中发电机的功角特性曲线包括: 正常运行 ( $P_1$ )、故障切除后 ( $P_3$ )、故障时无 SFCL ( $P'_2$ ) 和故障时投入 SFCL ( $P_2$ )。正常运行时, 发电机向无穷大系统输送的功率为  $P_0$ , 原动机的输入功率为  $P_T = P_0$ , 发电机的工作点为  $a$  点, 对应功角为  $\delta_0$ ; 发生短路瞬间

功角特性曲线立即降为  $P'_2$ , 工作点移动到  $b$  点, 此时发电机转子加速, 考虑超导体失超可能的延时, 当工作点沿  $P'_2$  移动到  $c$  点时, 功角特性曲线立即变为  $P_2$ , 工作点变为  $d$  点; 当工作点沿  $P_2$  移动到  $e$  点时继电器保护动作, 故障被切除, 功角特性曲线又立即变为  $P_3$ , 工作点也相应变为  $f$ , 这时发电机的转子受到制动而开始减速。从图 3 上可以看出, SFCL 对暂态稳定性的影响实质上就是减小了系统的加速面积  $S_3$ , 使转子功角摇摆的幅值有所减小, 极限切除角有所增大。因此, 电感型 SFCL 的投入会对暂态稳定性产生积极作用。

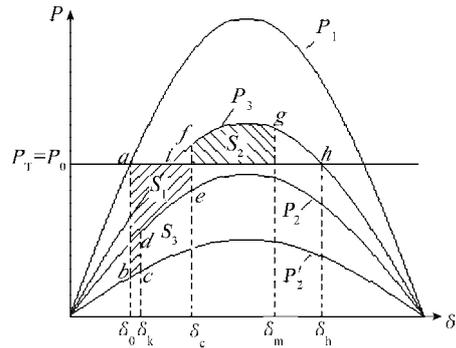


图 4 具有电感型 SFCL 的功角特性曲线

Fig. 4 Functional feature curve with inductor type SFCL

**2.2 超导限流器投入的电抗值一定, 故障位置不同**

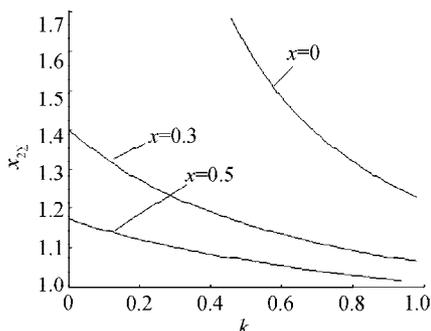
由 2.1 可知, 不管在输电线路的任何位置发生故障, 只要投入电感型 SFCL, 都能对暂态稳定性产生有利影响。但当投入电感型 SFCL 的电抗值一定时, 不同位置发生故障, 对暂态稳定产生有利影响的程度是不同的。只要找出极值点, 即影响程度的最大点和最小点, 当整定电感型 SFCL 的电抗值时, 按影响程度最小点的位置整定计算即可。

分析不同位置发生故障时, 把  $x$  看作常数,  $x_{2\Sigma}$  看作是以  $k$  为自变量的函数, 即  $x_{2\Sigma}=f(k)$ , 由于:

$$\frac{dx_{2\Sigma}}{dk} = \frac{-x_1x_L^2}{(x+kx_L)^2} < 0 \quad (11)$$

可以看出,  $x_{2\Sigma}$  是一个关于  $k$  的单调递减函数, 对于一个理想的单机对无穷大系统, 当投入电感型 SFCL 的电抗值一定时, 发生故障的位置距离线路母线  $A$  越远, 总转移电抗就越小, 从而对暂态稳定性产生有利影响的程度就越大。因此, 最佳位置出现在输电线路末端, 影响最小点在线路首端, 整定时按首端位置发生故障时进行整定。

图 5 为 SFCL 投入电抗  $x$  分别为 0、0.3 与 0.5 时, 总电抗与故障位置关系曲线  $x_{2\Sigma}=f(k)$ 。从图 5 可以看出, 随着故障位置的向后移动, 总电抗逐渐减小, 投入电抗值大时, 总电抗会更小。

图5 总电抗  $x_{2\Sigma}$  与故障位置  $k$  关系曲线Fig. 5 Relation curve between  $x_{2\Sigma}$  and  $k$ 

### 2.3 仿真分析

还可以从仿真图形上分析电感型 SFCL 对暂态稳定性的影响情况, 只要将发生短路故障时有 SFCL 和无穷大系统的功角摇摆曲线进行比较即可。假设发生故障的位置相同, 且在相同时间内将故障切除, 比较第一摇摆周期内的摇摆幅度, 如果幅值减小, 则说明振荡的时间短, 有利于暂态稳定。也可以分析发生故障位置不同时影响情况。

通过用改进欧拉法对系统的非线性微分方程式进行求解, 得到如图 6 所示的  $\delta-t$  功角摇摆曲线, 其中超导体失超时间设为 0.01 s, 故障切除时间设为 0.2 s, 阻尼系数设为 2。

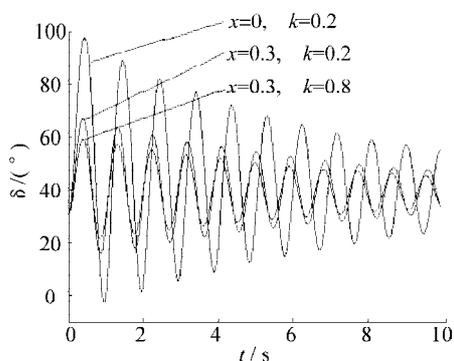


图6 投入电感型 SFCL 后的功角摇摆曲线

Fig. 6 Power-angle swing curves with inductor type SFCL

从图 6 上可以清楚地看出, 加入电感型 SFCL 可以明显地降低第一摇摆周期内的摇摆幅度, 有利于暂态稳定; 还可以看出故障位置距离发电机较远时, 第一摇摆周期内的摇摆幅度会相应减小。从而验证了 2.1、2.2 中理论分析的正确性, 对于一个理想的单机对无穷大系统, 投入的电抗越大, 故障位置越向后, 越有利于电力系统的暂态稳定。

## 3 电阻型超导故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响

当一回线路发生故障, 电阻型超导故障限流器装置投入电阻后, 其最终等值电路如图 7。

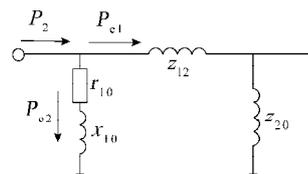


图7 电阻型 SFCL 变形后等值电路

Fig. 7 Equivalent circuit with resistor type SFCL

从而, 发电机的电动势与无穷大系统间的各阻抗为:

$$z_{12} = \frac{-x_1 x_L r + j(A_1 r^2 + k x_L A_0)}{r^2 + k^2 x_L^2} = r_{12} + jx_{12}, \quad (12)$$

$$z_{10} = r_{10} + jx_{10} = \frac{A_1 r + jA_0}{x_L}, \quad (13)$$

其中:  $A_1 = x_1 + x_L$ ;  $A_0 = x_L (kx_L + kx_1 + x_1)$ 。

由图 7 可知, 发电机输出的电磁功率由两部分组成: 经阻抗  $z_{12}$  向无穷大母线输送的功率  $P_{e1}$  和消耗在接地支路  $z_{10}$  上的功率  $P_{e2}$ 。各运算公式<sup>[11]</sup>为:

$$\beta = \cot^{-1} \frac{r_{12}}{x_{12}}, \quad (14)$$

$$P_{e1} = \frac{r_{12} E'^2}{r_{12}^2 + x_{12}^2} + \frac{E' U}{\sqrt{r_{12}^2 + x_{12}^2}} \sin(\delta - \beta) = \Delta P_{e1} + P_{e1}' \sin(\delta - \beta), \quad (15)$$

$$P_{e2} = \frac{r_{10} E'^2}{r_{10}^2 + x_{10}^2}, \quad (16)$$

$$P_2 = P_{e1} + P_{e2} = P_{e2} + \Delta P_{e1} + P_{e1}' \sin(\delta - \beta) + P_1 + P_{e1}' \sin(\delta - \beta). \quad (17)$$

### 3.1 故障位置一定, 超导限流器投入的电阻值变化

为便于分析比较线路发生故障时, SFCL 投入电阻  $r$  后对暂态稳定的影响情况, 把  $P_1$  和  $P_{e1}'$  看作是以  $r$  为自变量的函数,  $r$  为零时相当于没有 SFCL 的情况。分析  $P_1$  和  $P_{e1}'$  的变化情况, 就可以判断出  $P_2$  的变化情况, 从而间接判断出加入电阻型 SFCL 后对暂态稳定性的影响情况。由于

$$P_1 = P_{e2} + \Delta P_{e1} = \frac{E'^2 x_L^2 r}{A_1^2 r^2 + A_0^2}, \quad (18)$$

$$\frac{dP_1}{dr} = -\frac{E'^2 x_L^2 (A_1^2 r^2 - A_0^2)}{(A_1^2 r^2 + A_0^2)^2}, \quad (19)$$

显然, 当  $0 < r < A_0/A_1$  时,  $\frac{dP_1}{dr} > 0$ ,  $P_1(r)$  为递增函数;

当  $r > A_0/A_1$  时,  $\frac{dP_1}{dr} < 0$ ,  $P_1(r)$  变为递减函数。

从而可以看出, 电阻型 SFCL 随着投入的电阻值从零开始增大, 消耗发电机的功率逐渐增加, 当投入的阻值为  $r=A_0/A_1$  时, 消耗的功率达到最大值

$$P_{1\max} = \frac{E'^2 x_L^2}{2A_1 A_0};$$

之后, 随着投入阻值的继续增大, 消耗的功率开始逐渐减小, 最后趋向于零。由于等效变换后的  $r_{10}$  处于机端, 相当于给发电机投入制动电阻, 消耗发电机输出的电气功率。因为  $r_{10}=A_1 r/x_L$  与  $r$  成正比, 所以当  $r=0$  时, 相当于短路没有 SFCL 的情况;  $r$  为无穷大时,  $r_{10}$  相当于开路。

发电机向无穷大系统输送功率的幅值由下式给出:

$$P_{cl}' = E'U \sqrt{\frac{r^2 + k^2 x_L^2}{A_1^2 r^2 + A_0^2}}, \quad (20)$$

$$\frac{dP_{cl}'}{dr} = \frac{A_2 r}{\sqrt{(A_1^2 r^2 + A_0^2)^3 (r^2 + k^2 x_L^2)}} > 0, \quad (21)$$

其中:  $A_2 = E'U x_1 x_L^2 (x_1 + 2kx_1 + 2kx_L)$ 。

可以看出  $P_{cl}'$  是一个关于  $r$  的单调递增函数, 所以, 不管在输电线路的任何位置发生故障, 只要投入电阻型 SFCL, 都能使  $P_{cl}'$  增大, 且随着  $r$  增大,  $P_{cl}'$  也逐渐增大。

综上所述, 故障时, 只要投入电阻型 SFCL, 不管阻值大小,  $P_2$  的幅值总是大于不加 SFCL 的情况, 当投入的阻值为无穷大时,  $P_2$  的幅值相当于  $P_{3m}$  (故障切除后的情况)。当投入的电阻值在  $A_0/A_1$  附近时,  $P_2$  的幅值存在最大值, 可能使发电机的输出功率远大于原动机的机械功率, 使转子受到制动而减速。如果输出电气功率过大, 可能导致转子制动过度, 使其振荡加剧, 从而对暂态稳定产生不利的影响。

图 8 为故障位置  $k$  分别为 0、0.25、0.75 和 1, 投入电阻型 SFCL 的阻值逐渐增大时的功率幅值变化曲线  $P_{2m}=f(r)$ 。从中可以看出随着投入电阻的逐渐增大, 总输出功率幅值会先增大后减小, 最后稳定于某一值。

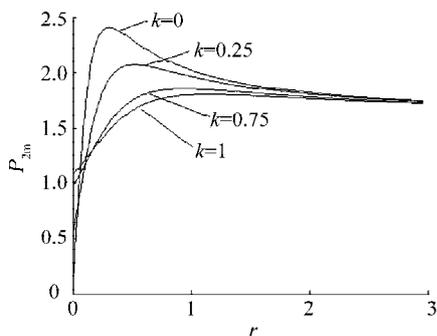


图 8 输出功率幅值  $P_{2m}$  与投入电阻  $r$  的关系曲线

Fig. 8 Relation curve between  $P_{2m}$  and  $r$

通过图 9 可以详细描述发生故障瞬间以及电阻型 SFCL 投入时, 发电机转子的运动情况。

图 9 中发电机的功角特性曲线包括: 正常运行 ( $P_1$ )、故障切除后 ( $P_3$ )、故障无 SFCL ( $P_2'$ ) 和故障时投入电阻型 SFCL ( $P_2$ )。正常运行时, 发电机的工作点为  $a$  点, 对应功角为  $\delta_0$ ; 故障后工作点从  $P_1$  上的  $a$  点跃变为  $P_2'$  上的  $b$  点, 发电机转子开始加速; 工作点到达  $c$  点后, 超导体失超, 功角特性立即变为  $P_2$ , 工作点由  $c$  点变为  $d$  点, 此时由于  $P_2$  大于  $P_T$ , 发电机转子开始减速; 当由于 SFCL 动作延时导致的轻微加速到  $e$  点被抵消后, 发电机角度开始回摆, 工作点沿  $P_2$  移动到  $f$  点; 在  $f$  点, 继电保护动作切除故障, 功角特性曲线立即变为  $P_3$ , 工作点也相应跃变到  $g$  点, 这时发电机的转子进入加速状态, 一直到工作点  $i$ ; 之后又开始减速, 由于 SFCL 电阻的投入, 减速面积  $S_4$  得到了利用。

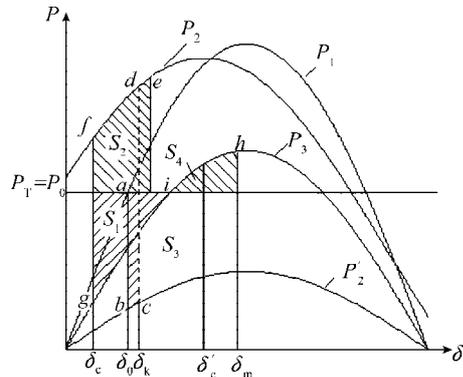


图 9 具有电阻型 SFCL 的功角特性曲线

Fig. 9 Functional curve for resistor type SFCL

从图 9 可以看出, 由于减速面积  $S_2$  的存在, 使故障后的发电机转子在加速之前首先减速回摆, 如果故障切除时间过长, 使  $S_2$  过大, 可能带来过度制动而不利于暂态稳定。图 10 给出了 SFCL 投入不同电阻值时, 发电机加速面积的对比情况。

图 10a) 为投入电阻值  $r$  在  $A_0/A_1$  附近时的功角特性曲线,  $S_1$  为投入电阻型 SFCL 后引起的加速面积,  $S_3$  为无 SFCL 时的加速面积。通过比较  $S_1$ 、 $S_3$  就可以判断出电阻型 SFCL 对电力系统暂态稳定性的影响情况, 如果  $S_1 < S_3$ , 将有利于暂态稳定; 反之, 如果  $S_1 > S_3$  相当于制动过度, 发电机减速过多, 将不利于暂态稳定。图 10b) 为投入较大电阻值时的功角特性曲线, 显然, 由于  $P_2$  幅值的减小, 使发电机转子减速回摆的程度降低, 加速面积  $S_1$  变小, 更有利于暂态稳定。从前面的分析可以知道: 投入电阻值  $r$  越大,  $P_2$  的幅值越接近  $P_{3m}$ , 也就是功角特性曲线  $P_2$  和  $P_3$  越接近, 也就越有利于电力系统的暂态稳定。

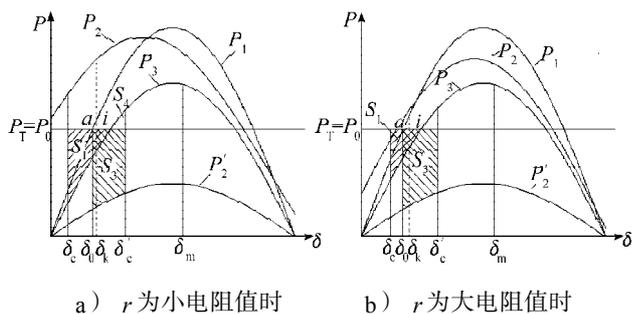


图 10 不同电阻值时的加速面积比较

Fig. 10 Accelerating areas comparing with different resistor value

### 3.2 超导限流器投入的电阻值一定, 故障位置不同

当投入电阻型 SFCL 的电阻值一定时, 输电线路的不同位置发生故障, 对暂态稳定性产生的影响程度是不同的。把  $P_1$  和  $P'_{cl}$  看作是以  $k$  为自变量的函数, 由于

$$P_1 = P_{e2} + \Delta P_{cl} = \frac{E'^2 x_L^2 r}{A_1^2 r^2 + A_0^2} > 0, \quad (22)$$

$$\frac{dP_1}{dk} = -\frac{M_1 k + M_0}{g^2(k)} < 0, \quad (23)$$

其中:  $M_1 = 2rx_L^4 A_1^2 E'^2$ ;  
 $M_0 = 2rx_L x_1^4 A_1 E'^2$ ;  
 $g(k) = A_1^2 r^2 + A_0^2$ 。

所以, 当故障位置逐渐向后移动时,  $P_1$  将逐渐减小, 使功角曲线移动的幅度逐渐减小。这主要是由于等效电路图 7 分支  $z_{10}$  中,  $r_{10} = A_1 r / x_L$  与  $k$  无关, 而  $x_{10} = A_1 k + x_1$  会随着  $k$  的增大而增大, 所以  $P_{e2}$  会随着  $k$  的增大而减小。由于

$$\frac{dP'_{cl}}{dk} = \frac{A(k-k_1)(k-k_2)}{\sqrt{(r^2 + k^2 x_L^2)} g^3(k)}, \quad (24)$$

其中:  $A = x_1 x_L^4 A_1 E' U$ ;

$$k_1 = \frac{\sqrt{x_1^2 x_L^2 + 4r^2 A_1^2} - \sqrt{x_1^2 x_L^2}}{2x_L A_1};$$

$$k_2 = -\frac{\sqrt{x_1^2 x_L^2 + 4r^2 A_1^2} + \sqrt{x_1^2 x_L^2}}{2x_L A_1}。$$

显然, 当  $0 < k < k_1$  时,  $\frac{dP'_{cl}}{dk} < 0$ ,  $P_{e2}(r)$  为递减函数; 当

$k_1 < k < 1$  时,  $\frac{dP'_{cl}}{dk} > 0$ ,  $P_{e2}(r)$  为递增函数。由于

$$\frac{dk_1}{dr} = \frac{2A_1 r}{x_L \sqrt{4A_1^2 + x_1^2 x_L^2}} > 0, \quad (25)$$

且  $r = x_L \sqrt{1 + x_1 / A_1}$  时,  $k_1 = 1$ , 所以, 当  $r < x_L \sqrt{1 + x_1 / A_1}$  时,

$k_1 < 1$ ,  $P'_{cl}$  在区间  $0 < k < 1$  上是一个凹函数, 且在  $k_1$  点处,  $P'_{cl}$  处于最小值点。然而, 当  $r > x_L \sqrt{1 + x_1 / A_1}$  时,  $k_1 > 1$ ,  $P'_{cl}$  在区间  $0 < k < 1$  上是一个减函数, 因此, 在线路的末端, 为  $P'_{cl}$  的最小值点。

图 11 为投入电阻  $r$  分别为 0、0.05、0.2 与 0.5 时, 故障位置与功率幅值的变化曲线  $P_{2m} = f(k)$ 。当线路上没有 SFCL 时, 输出功率幅值会随着故障位置的向后移动而逐渐增大, 暂态稳定性逐渐变好; 当投入小电阻时, 输出功率幅值会随着故障位置的向后移动先减小再逐渐增大, 同时与没有 SFCL 的幅值逐渐接近; 而投入一个大的电阻时 (例如 0.5 以上), 输出功率幅值会随着故障位置的向后移动逐渐减小, 并接近故障切除后的值。因此, 当投入电阻值很小 (例如 0.05) 时, 故障位置后移会由于与  $r=0$  的幅值曲线逐渐接近而对暂态稳定的有利影响程度逐渐减小; 当投入电阻大于某一数值后, 故障位置后移将有利于电力系统的暂态稳定。电阻值在中间某个数值范围内 (例如 0.2 左右), 随着故障位置从线路首端向末端移动, 暂态稳定性会呈现先变好然后有利影响程度逐渐变小的过程。

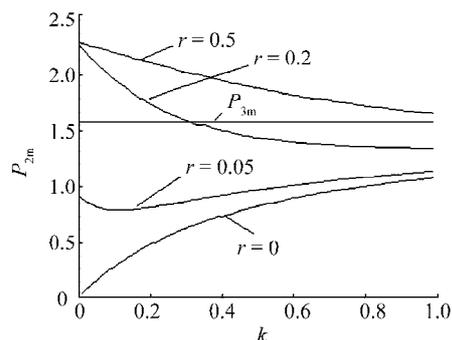


图 11 输出功率幅值  $P_{2m}$  与故障位置  $k$  关系曲线

Fig. 11 Relation curves between  $P_{2m}$  and  $k$

### 3.3 仿真分析

由前面的分析可知, 电阻型 SFCL 对电力系统暂态稳定影响要比电感型复杂。仍可用改进欧拉法对转子运动的非线性微分方程进行求解, 得出  $\delta - t$  功角摇摆曲线。图 12 为在输电线路的四分之一处发生故障, 投入不同电阻值时对应的功角摇摆曲线, 其中超导体失超时间设为 0.01 s, 故障切除时间设为 0.2 s, 阻尼系数设为 2。当投入电阻很小时, 很明显有利于暂态稳定, 但不能达到限制短路电流的效果; 随着电阻的逐渐增大, 第一摆角度摇摆曲线的幅值会先增大再减小, 从而对电力系统暂态稳定性的影响程度有所变化。特别是当  $r=0.5$  时, 由于过度制动, 使摇摆曲线有一个很大的反方向摆动, 此时对暂态稳定带来不利的影 响。如果故障切除时间过长, 可能会由于发电机减速过度而失去稳定。当  $r$  大于某一数值后 (例如  $r=2$ ), 随着  $r$  的增大, 将越来越有利于暂态稳定。

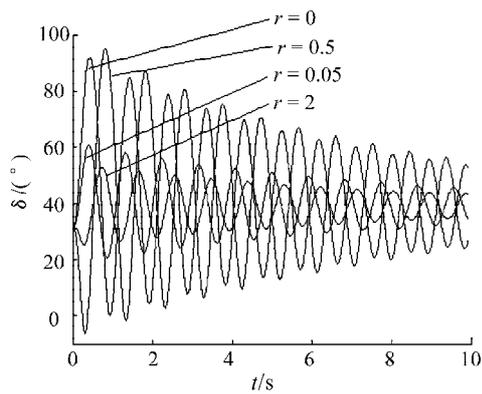


图 12 投入电阻型 SFCL 后的功角摇摆曲线

Fig. 12 Functional swing curves with resistor type SFCL

## 4 结论

本文通过对装有 SFCL 的电力系统暂态稳定性进行物理分析和时域仿真研究,揭示了电感型和电阻型 SFCL 对系统暂态稳定性的影响规律。

故障时在输电线路中投入电感型 SFCL 时,会对电力系统的暂态稳定性产生有利影响,并且随着故障位置的向后移动,总电抗逐渐减小,从而使有利程度会逐渐增加。而电阻型 SFCL 对暂态稳定性的影响呈现出复杂的变化情况:当投入电阻较小时,有利于暂态稳定,但不能达到限制短路电流的效果,并且随着故障位置的向后移动,对暂态稳定的有利影响程度逐渐减小;当投入的电阻值继续增大时,输出功率的幅值  $P_{2m}$  会有一个最大值,此时可能由于过度制动而不利于暂态稳定;当  $r$  大于某一数值后,随着  $r$  的增大,  $P_{2m}$  将逐渐减小而接近于  $P_{3m}$ ,从而越来越有利于暂态稳定,此时,随着故障位置的向后移动,  $P_{2m}$  同样趋向于  $P_{3m}$ ,系统暂态稳定性会变好。

本文只分析了单机对无穷大系统在线路不同位置上发生三相短路时 SFCL 对系统暂态稳定性的影响情况,对于不对称故障情况下和 SFCL 在多机系统中的应用情况有待进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] 张永,牛潇晔,王洋,等.超导故障限流器[J].国际电力,2005,9(2):57-60.
- [2] 李兴源,刘焕柳.超导故障限流器及其进展[J].中国电力,1996,29(6):58-62.
- [3] 杨勇.超导技术的发展及其在电力系统中的应用[J].电网技术,2001,25(9):48-60.
- [4] 叶莺,肖立业.超导故障限流器的应用研究新进展[J].电力系统自动化,2005,29(13):92-96.
- [5] 张绪红,周有庆.超导故障限流器的结构及特点[J].低温与超导,2002,30(4):20-25.
- [6] 叶林,林良真.超导故障限流器的电力应用研究进展[J].电力系统自动化,1999,23(7):53-56.
- [7] Sugimoto S, Kida J, Arita H, et al. Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation[J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1996, 11(2): 842-847.
- [8] Marten Sjostrom, Rachid Cherkaoui, Bertrand Dutoit. Enhancement of Power System Transient Stability Using Superconducting Fault Current Limiters[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 1999, 9(2): 1328-1330.
- [9] 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.
- [10] 郝志杰,江道灼,蔡永华.新型固态故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响[J].电力系统自动化,2004,28(8):50-56.
- [11] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:中国电力出版社,2006.