

故障限流器对系统暂态稳定性影响的仿真分析

霍晓玉, 孙频东, 龙 鹏

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 根据故障限流器(FCL)按其旁路阻抗性质可分为电抗型、电阻型和阻抗型三种类型. 针对单机无穷大系统, 推导出了在输电线路发生短路故障时, 投入故障限流器后的总转移阻抗和发电机的输出功率表达式. 并仿真研究了含故障限流器的单机无穷大系统的功角特性. 结果表明, 故障限流器可以减小系统在暂态时域内的发电机转子的加速面积, 提高系统的暂态稳定性.

[关键词] 故障限流器, 阻抗特性, 功角曲线, 暂态稳定性

[中图分类号] TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)02-0016-08

Simulation Analysis of the Influence of Fault Current Limiter on Power System Transient Stability

Huo Xiaoyu, Sun Pindong, Long Peng

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: According to the characteristics of fault current limiter(FCL), the FCL can be divided into three types: inductor type, resistor type and R-L type. The total transfer impedance and the generator power-output expressions are deduced after introducing FCL when short circuit faults occur on a transmission line in a single machine to infinite-busbar system, and simulation is made on the power-angle characteristics of a single unit infinite system with a fault current limiter. The results show that the fault current limiter can reduce the acceleration area of generator rotor when the system is in transient time domain as to improve the transient stability of the system.

Key words: FCL, impedance, power-angle curve, transient stability

随着电网的飞速发展, 其规模不断扩大, 互联程度愈发紧密, 导致其短路电流水平不断攀升, 极大影响了其安全运行^[1-3]. 电力系统发生短路故障便会引起大幅度振荡, 甚至会失去稳定, 从而造成大量用户供电中断, 威胁到电力系统的安全性与可靠性^[4-7]. 因此, 电力系统暂态稳定性影响的研究具有非常重大的实际意义. 文献[8-10]分别从多角度出发, 探讨了电力系统发生短路故障后, 短路限流器应用于系统时对系统不同方面的影响, 并得出一些有价值的成果. 但总体来说, 这些文献大都以超导型短路限流器在系统中的应用为研究内容, 并从仿真计算的途径去分析, 而从理论角度去详细分析这个问题的研究却并不常见. 因此, 本文将采用不同于已有的分析方法, 注重理论分析, 并结合仿真波形, 得出系统发生短路故障后故障限流器的应用对系统暂态稳定性影响的结论.

1 具有FCL系统的结构模型

本文在理想的单机无穷大系统模型下研究电力系统暂态稳定性, 系统模型如图1(a)所示, 故障限流器等效模型如图1(b)所示, 其中 Z_F 是纯电感、纯电阻或R-L串联的阻抗; 传输线两端的FCL为故障限流器, CB为断路器; S为接地短路模拟开关, 系统正常运行时, 发电机经变压器和双回线路向无穷大系统供电.

收稿日期: 2016-01-16.

基金项目: 南京师范大学科研基金(2008111XLH0069).

通讯联系人: 孙频东, 副教授, 研究方向: 电力电子与电力传动. E-mail: 61019@njnu.edu.cn

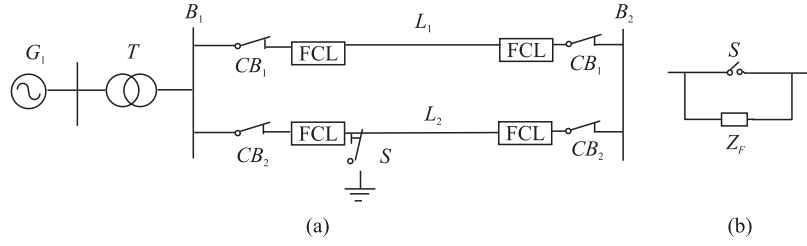


图1 单机对无穷大系统模型

Fig.1 One machine infinite power system model

图中发电机采用 E' 恒定的经典二阶模型. 相关参数为: 系统频率为 50 Hz; 发电机 G_1 : 额定容量 300 MVA, 额定功率 240 MW, 内电抗 $X_d' = 0.1$ (标么值, 下类同), 惯性时间常数 $T_J = 6.0$ s, 阻尼系数 $D = 5$. 变压器漏电抗 $X_T = 0.05$, 线路 L_1 、线路 L_2 的阻抗 $X_{L1} = X_{L2} = X_L = 0.08$. 从图 1(a) 中可以看出, 当线路 L_2 发生三相短路时, 如果没有及时采取辅助措施, 那么 B_1 母线三相电压就会迅速下降接近于 0, 导致发电机不能向系统输送有效功率. 若短路故障不能及时切除的话, 将会严重破坏无大系统与发电机之间的稳定性. 新型固态短路限流器的应用能够迅速将大短路电流限制到继电保护要求的数值范围内, 有效避免上述不良状况的发生, 而其限流效果与其旁路阻抗特性紧密相关. 由于固态限流器按其旁路阻抗性质可分为电抗型、电阻型和阻抗型三类, 本文下面也将分别针对三种类型限流器对系统暂态稳定的影响进行详细分析.

2 电抗型 FCL 对系统暂态稳定的影响

对于图 1(a) 所示的电力系统, 从正常运行到故障切除经历了正常情况、线路 L_2 发生短路故障、限流器投入系统、故障切除等四个阶段. 当图 1(a) 所示系统中安装的限流器类型为电抗型限流器, 且短路故障为三相接地短路故障时, 则系统在这四个阶段下的等值电路就如图 2 所示. 可从发电机的功角特性出发, 来分析系统的暂态稳定性, 由电磁功率方程 $P = \frac{E'U}{X} \sin \delta = P_m \sin \delta$ 可知, 当电动势 E' 和母线电压 U 为恒定值时, 发电机的输出功率幅值 P_m 则由外阻抗 X 的值决定.

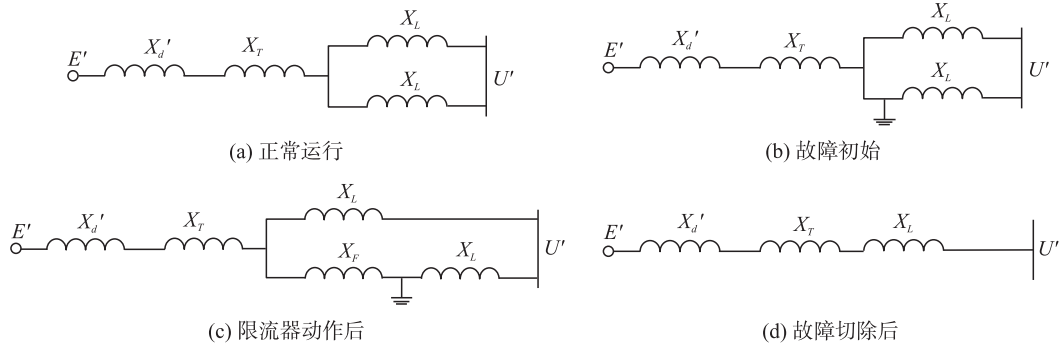


图2 各种情况下系统的等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of the system in different circumstances

四个阶段下的系统阻抗、电磁功率方程如下:

(1) 如图 2(a) 所示, 系统正常情况下时:

$$X_1 = X_d' + X_r + \frac{X_L}{2}, \quad (1)$$

$$P_I = \frac{E'U}{X_1} \sin \delta = P_1 \sin \delta. \quad (2)$$

(2) 如图 2(b) 所示, 故障发生而 FCL 未动作时:

$$X_2 = \infty, \quad (3)$$

$$P_{II} = \frac{E'U}{X_2} \sin \delta = P_2 \sin \delta = 0. \quad (4)$$

(3)如图 2(c)所示,FCL 动作后:

$$X_3 = X_d' + X_T + X_L + \frac{(X_d' + X_T)X_L}{X_F}, \quad (5)$$

$$P_{III} = \frac{E'U}{X_3} \cdot \sin \delta = P_3 \cdot \sin \delta. \quad (6)$$

(4)如图 2(d)所示,故障切除后:

$$X_4 = X_d' + X_T + X_L, \quad (7)$$

$$P_{IV} = \frac{E'U}{X_4} \cdot \sin \delta = P_4 \cdot \sin \delta. \quad (8)$$

由式(1)、式(3)、式(5)、式(7)可知:

$$X_1 < X_4 < X_3 < X_2, \quad (9)$$

则对应各个阶段的电磁功率幅值关系为:

$$P_I > P_{IV} > P_{III} > P_{II}. \quad (10)$$

将式(5)中的 X_3 取不同值时,可画出功角特性曲线如图 3 所示. 图 3(a)中曲线 P_I 为系统正常运行时的功角曲线;曲线 P_{II} 为发生短路故障限流器未动作时的功角曲线;曲线 P_{III} 为发生短路故障限流器动作后的功角曲线;曲线 P_{IV} 为发生短路故障线路被切除后的功角曲线. 区域 I 为发生短路故障,线路中串入限流电抗后的发电机加速面积. 区域 II 为响应的减速面积. 从图 3(a)中可见区域 II 的面积大于区域 I 的面积,所以该系统是能稳定的. 在图 3(b)中,曲线 P_I 的意义同图 3(a),曲线 P_{IV} 为发生三相短路,接入短路限流器后的功角曲线. 串入限流器后,发电机的输出功率没有减小反而增大,所以发电机的功角 δ 是减小的,摆动范围也随之减小. 若改变短路限流器阻抗 Z_F 的值,曲线 P_{IV} 的最大值和初始值是可以改变的,取另一组 Z_F 值时,功角曲线的形状将有变化,如图 3(c)的曲线 P_{IV} 所示. 这时,发电机有加速面积,但很小,因此发电机的功角 δ 虽然有所增加,但总的摆动幅值并不大,从图 3(c)可见系统的稳定裕量是比较大的.

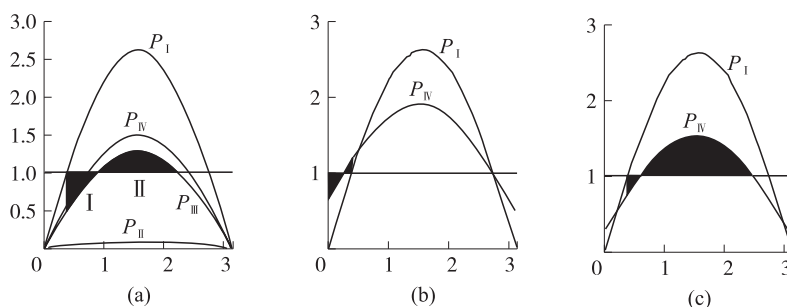


图 3 不同限流阻抗下的功角变化曲线

Fig.3 Power-angle curves under different current limiting impedance

因此,可以得出以下结论:系统发生短路故障时,故障限流器的动作可以有效减少系统的加速面积,即系统发生短路故障期间汽轮机转子的过剩动能减小,从而提高系统的暂态稳定能力. 虽然自动重合闸也能够增加系统的减速面积从而提高系统的稳定性,但是这种方式重合于永久性故障,更加破坏了系统的暂态稳定,因此,故障限流器的应用更能够有效、实用地提高系统的暂态稳定性.

由式(5)和式(6)可知,当系统输电线路 L_2 发生短路故障后,故障限流器的快速动作能够有效提高发电机的电磁功率特性幅度,其随着限流器旁路电抗 X_F 大小而变化的规律如图 4 所示. 从图 4 中可以看出,当系统中未安装故障限流器(即 $X_F=0$)且发生短路故障时,由式(3)可知,这时系统的转移电抗 X_2 为无穷大,从而造成发电机转子上的机械功率不能转换为电磁功率发出,也就是说,转子会获得最大的过剩转矩而加速电机失步. 如若系统中安装故障限流器,则短路故障发生后,由式(5)可知,此时系统的转移电抗就变为 X_3 ,即转移电抗的

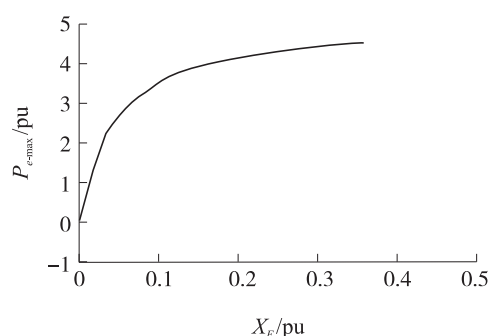


图 4 电磁功率与限流电抗关系曲线

Fig.4 Relation between output power and limiting reactance

值会随着故障限流器旁路电抗 X_F 的增大而减小,从而使得故障后发电机转子上的过剩转矩也随着限流器旁路电抗 X_F 的增加而减小,大大减小了发电机发生失步的可能性.因此,故障限流器旁路电抗 X_F 值的合理设置,能够有效增强系统发生短路故障时发电机的功率输出,从而提高系统的暂态稳定能力.

图 5 给出了模型系统线路 L_2 发生三相短路故障后对应不同限流电抗 X 时的发电机功角摇摆曲线.

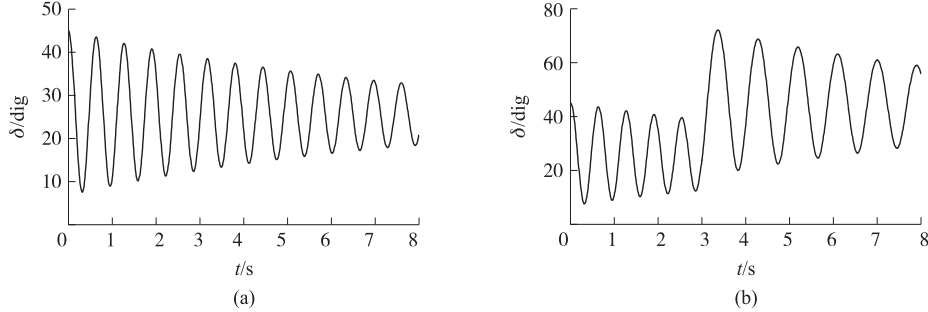


图 5 发电机功角曲线

Fig.5 Generator power-angle curves

图 5(a)表明,系统正常运行时,发电机的转速和功角在工作点附近经时经过一段时间的振荡后,会趋于某个稳定值.如图 5(b)表明,在当系统发生三相短路故障后,故障限流器快速投入系统且在极限时间切除故障后,由于系统的等效阻抗减小,而原动机的输出仍维持原输出功率,这使发电机的转速和功角在工作点附近振幅发生变化,需经过一段时间的振荡后,才会趋于某个稳定值.

3 电阻型 FCL 对系统暂态稳定的影响

当系统模型中安装的限流器为电阻型故障限流器时,线路 L_2 发生三相短路故障后,限流器快速动作并投入限流电阻 R_F ,此时,系统的等值电路如图 6 所示.

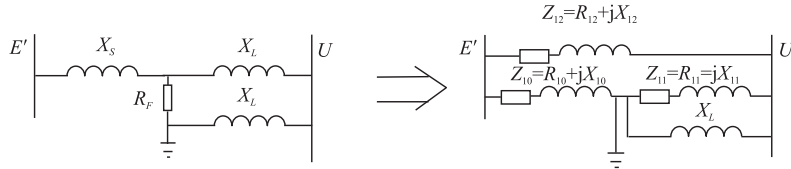


图 6 串入限流电阻后系统的等值电路

Fig.6 Equivalent circuit while inserting limiting resistance

系统转移阻抗为:

$$Z_{12} = jX_s + jX_L + \frac{jX_s \cdot jX_L}{R_F} = -\frac{X_s \cdot X_L}{R_F} + j(X_s + X_L) = R_{12} + jX_{12}, \quad (11)$$

$$Z_{10} = jX_s + R_F + \frac{jX_s \cdot R_F}{jX_L} = R_F \left(1 + \frac{X_s}{X_L} \right) + jX_s = R_{10} + jX_{10}. \quad (12)$$

由图 6 可知,系统发生短路故障后,限流器快速动作并投入旁路电阻 R_F 后,发电机输出的有功功率一部分消耗在等效阻尼电阻 R_{10} 上,另一部分则经由阻抗 Z_{12} 输送给无穷大功率母线.显然,经阻抗 R_{12} 输送给无穷大功率母线的有功功率(P_{e1})也包括两部分:一部分是注入无穷功率母线的有功功率 P_{e1}' ,另一部分则是消耗在转移电阻 R_{12} 上的功率 ΔP_{12} . 则有:

$$P_{e1} = P_{e1}' + \Delta P_{12}. \quad (13)$$

从图 6 中可以看出串入限流器旁路电阻 R_F 后,注入电网的部分功率为:

$$S_{e1} = \frac{E' - U}{R_{12} + jX_{12}} \cdot U = \frac{(E' \cos \delta + jE' \sin \delta - U)(R_{12} - jX_{12})}{R_{12}^2 + X_{12}^2} \cdot U = P_{e1}' + jQ_{e1}', \quad (14)$$

式中 P_{e1}' 与 Q_{e1}' 分别为电源向无穷功率母线注入的有功功率与无功功率.比较等式(14)两边并整理后可以得出:

$$P_{e1}' = \frac{X_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} E' U \sin \delta + \frac{R_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} (E' U \cos \delta - U^2). \quad (15)$$

消耗于转移电阻 R_{12} 的有功功率表达式为:

$$\Delta P_{12} = R_{12} \cdot I_{12}^2. \quad (16)$$

另外,

$$I_{12}^2 = \frac{(E' \cdot \cos \delta - U)^2 + E'^2 \cdot (\sin \delta)^2}{R_{12}^2 + X_{12}^2}, \quad (17)$$

结合式(13)-(17),即可得到第一部分电磁功率 P_{e1} 的表达式:

$$P_{e1} = \frac{X_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} E' \cdot U \cdot \sin \delta + \frac{R_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} (E'^2 - E' \cdot U \cdot \cos \delta). \quad (18)$$

式中, $R_{12} = -(X_s \cdot X_L) / R_f$, $X_{12} = X_s + X_L$.

式(18)即为短路故障发生后串入限流器旁路电阻 R_f 后发电机输送至无穷大系统的有功功率表达式. 图 7(a)给出了系统模型参数为 $E' = 0.95$ 、 $X_s = 0.15$ 、 $X_L = 0.08$ 、 $U = 1.0$, δ 角分别为 30° 、 60° 和 90° 时, P_{e1} 随串入旁路电阻 R_f 增加的变化曲线. 图 7(b)给出了相同参数下的应用电抗型 FCL 时, P_{e1} 随串入旁路电抗 X_f 增加的变化曲线.

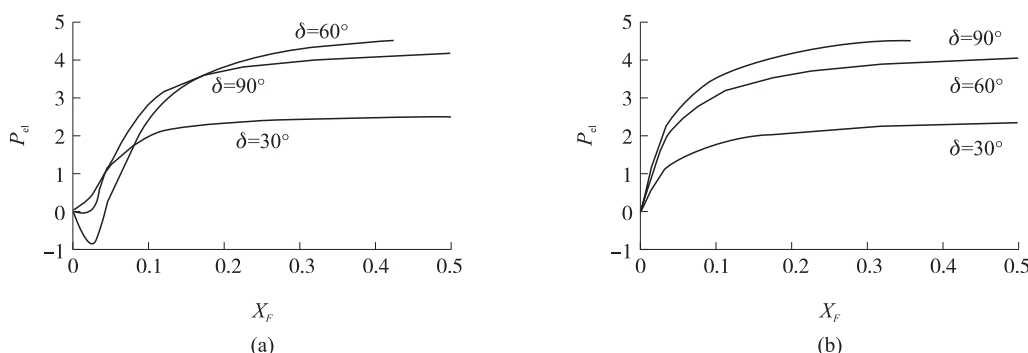


图7 功率 P_{e1} 与限流电阻、电抗的关系曲线

Fig.7 Relation between P_{e1} and limiting resistance and impedance

从图 7 中我们可以看出,电抗型 FCL 与电阻型 FCL 在系统发生短路故障后经 Z_{12} 向无穷大系统输送有功功率方面有着相似的变化趋势,都是随着限流器旁路电抗或旁路电阻的增加而增大,并最终趋向于平稳.但是,系统接入电阻型 FCL 时,且限流器旁路电阻值比较小时(如 0.035 pu),电磁功率 P_{e1} 就有可能出现负值,即发电机由 Z_{12} 等效支路吸收电网功率,这是一个需要留意的地方.另外还可以发现,采用电抗型 FCL 限流时的 P_{e1} 在限流电抗值较小时要大于同值电阻型 FCL 限流的情况.

由图 6 等值电路可知,在等效支路 Z_{10} 上消耗的功率为:

$$S_{e2} = \frac{E'^2}{Z_{10}}. \quad (19)$$

消耗在限流电阻上的有功功率为:

$$P_{e2} = \frac{R_{10} \cdot E'^2}{R_{10}^2 + X_{10}^2}. \quad (20)$$

式中, $R_{10} = (1 + X_s/X_L) R_f$, $X_{10} = X_s$.

显然,采用电阻型 FCL 时,等效阻尼电阻 R_{10} 的作用等效于机端短路投入阻尼电阻防止发电机发生飞车事故的情形. 图 8 示出了 $P_T = 2.4$ 、 $E' = 0.95$ 、 $X_s = 0.15$ 、 $X_L = 0.08$ 时,功率 P_{e2} 随旁路电阻 R_f 的变化曲线.

从图 8 中可以看出,一开始功率 P_{e2} 会随着限流电阻 R_f 的增加而增大,并在 $R_f \approx 0.065$ 时,出现极大值(4.37),随后随着限流电阻 R_f 的继续增加,功率 P_{e2} 会逐渐下降并趋近于 0. 有一点我们需要注意,发电机的额定出力是设定为 2.4,当系统发生短路故障后,限流器快速动作并投入限流电阻 R_f 时,功率 P_{e2} 有可能会远远超过发电机的额定出力,如图 8 中所示的极大值情况,这时发电机就会因输出的电磁功率(即 $P_{e1} + P_{e2}$)大大超过其输入的机械功率 P_T 而迅速减速进入到负功角运行状态.也就是说,发电机需要从无穷大系统吸收有功功率以保持其功率平衡.

以上分析表明,系统发生故障后,电抗型 FCL 接入故障线路后,发电机只需向无穷大系统输送电磁功率以平衡输入的机械功率;而采用电阻型 FCL 时,发电机除了向无穷大系统输送有功功率外,还需在等效阻尼上消耗一部分有功功率,它们一起组成发电机的电磁功率以平衡输入的机械功率.因此,若只考虑系统发生短路故障后系统的暂态稳定性问题,那么电抗型 FCL 的限流效果则比不上电阻型 FCL.此外,采用电阻型 FCL 时,旁路电阻 R_f 能很大程度上影响着系统的暂态稳定性,若取值适当的话,则可以有效消耗发电机的过剩功率,以增加系统的暂态稳定;若取值不当的话,就可能会出现发电机从电网吸收有功以弥补其功率严重不足的不良现象.

当 R_f 取较小值时,由图 7 和图 8 可知,功率 P_{e1} 和 P_{e2} 的值都很小,此时发电机的过剩功率会很大,若不能及时切除故障发电机的暂态功角就会失稳,如图 9(a)所示.当 $R_f=0.05$ 时,功率 P_{e1} 和 P_{e2} 的值都很大(对照图 7 和图 8),且仅 P_{e2} 的值就远远大于发电机的额定出力,因此,发电机转子上会产生一个很大的制动转矩使得发电机迅速减速迫使其功角 δ 进入负值区,也就是说,发电机将从电网上吸收有功功率.如果故障线路没有及时切除,那么发电机功角 δ 就会震荡并逐渐趋于一个负稳定值,如图 9(b)所示.当 $R_f=0.1$ 时,功率 P_{e1} 和 P_{e2} 的值较于 $R_f=0.05$ 时明显减小(对照图 7 和图 8),因此故障线路切除前和切除后的发电机角震荡时间和幅度都减小了许多,如图 9(c)所示.当 $R_f=1$ 时,功率 P_{e2} 的值已低于 1,此时虽然 $P_{e1}+P_{e2}$ 小于 $R_f=0.05$ 或 $R_f=0.1$ 时的值,但是能够平衡发电机的机械功率,即使短路故障发生后没有切除,其发电机功角将震荡并逐渐稳定于正值,如图 9(d)所示,即无穷大系统不会向发电机倒送有功.

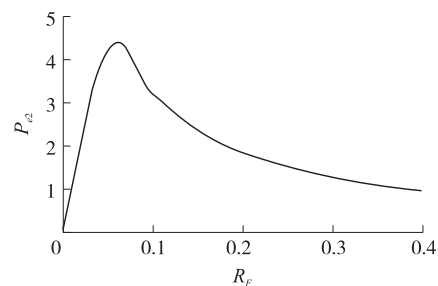
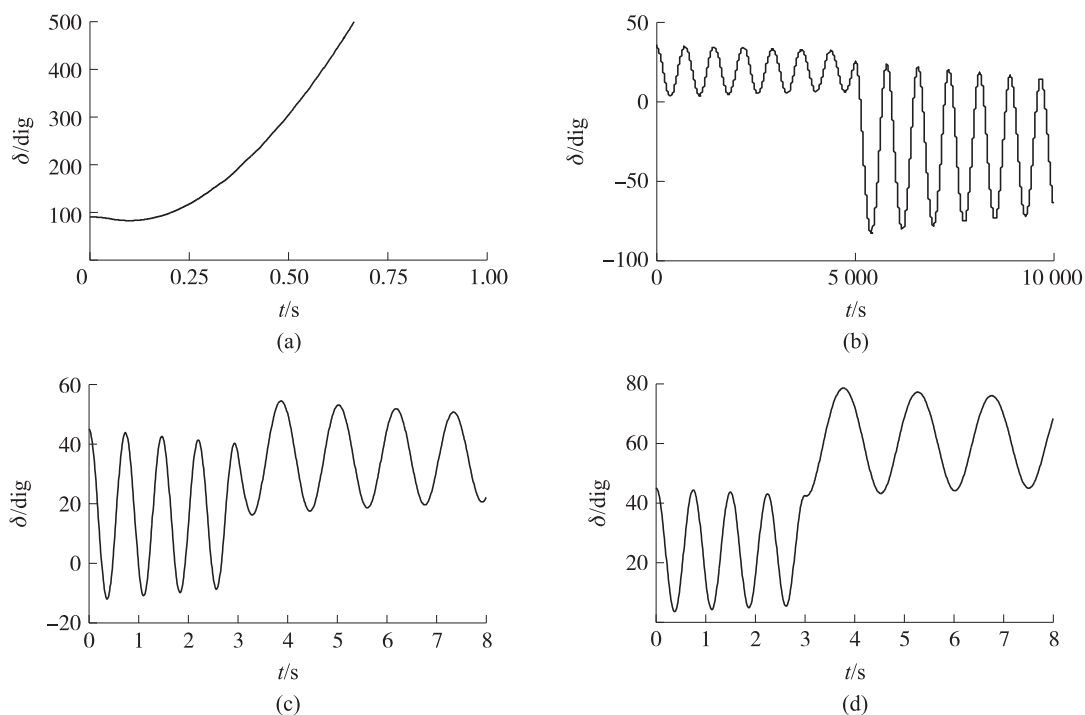
图8 功率 P_{e2} 与限流电阻的关系曲线Fig.8 Relation between P_{e2} and limiting resistance

图9 发电机功角曲线

Fig.9 Generator power-angle curves

4 阻抗型FCL对系统暂态稳定的影响

当系统模型中所安装的限流器为阻抗型 FCL 时,线路 L_2 发生三相短路故障后,限流器及时动作并投入限流阻抗 Z_f 时的等值电路如图 10 所示.

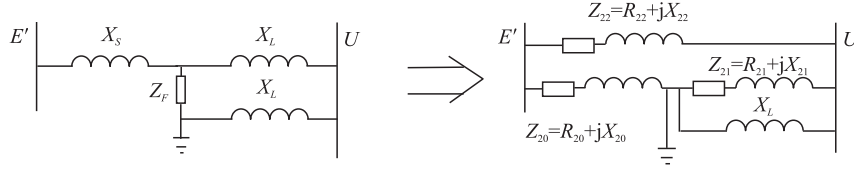


图10 串入限流阻抗后系统的等值电路

Fig.10 Equivalent circuit while inserting limiting impedance

系统转移阻抗

$$Z_{22} = jX_s + jX_L + \frac{jX_s \cdot jX_L}{R_F + jX_F} = -\frac{X_s \cdot X_L \cdot R_F}{R_F^2 + X_F^2} + j\left(X_s + X_L + \frac{X_s \cdot X_L \cdot X_F}{R_F^2 + X_F^2}\right) = R_{22} + jX_{22}, \quad (21)$$

$$Z_{20} = jX_s + (R_F + jX_F) + \frac{jX_s(R_F + jX_F)}{jX_L} = \left(1 + \frac{X_s}{X_L}\right)R_F + j\left(X_s + X_F + \frac{X_s \cdot X_F}{X_L}\right) = R_{20} + jX_{20}. \quad (22)$$

由图10可知,系统发生短路故障后,限流器快速动作并投入旁路阻抗 Z_F 后,发电机输出的有功功率也是包括两部分:一部分消耗在等效阻尼电阻 R_{20} 上,另一部分则经由阻抗 Z_{22} 输送给无穷大功率母线.经阻抗 Z_{22} 输送给无穷大功率母线的有功功率(P_{e3})则包括注入无穷功率母线的有功功率 P_{e3}' 和消耗在转移电阻 R_{22} 上的功率 ΔP_{22} .则有:

$$P_{e3} = P_{e3}' + \Delta P_{22}, \quad (23)$$

注入电网的部分功率为:

$$S_{e3} = \frac{E' - U}{R_{22} + jX_{22}} \cdot U = \frac{(E' \cos \delta + jE' \sin \delta - U)(R_{22} - jX_{22})}{R_{22}^2 + X_{22}^2} \cdot U = P_{e3}' + jQ_{e3}', \quad (24)$$

式中 P_{e3}' 与 Q_{e3}' 分别为电源向无穷功率母线注入的有功功率与无功功率.故

$$P_{e3}' = \frac{X_{22}}{R_{22}^2 + X_{22}^2} E' U \sin \delta + \frac{R_{22}}{R_{22}^2 + X_{22}^2} (E' U \cos \delta - U^2). \quad (25)$$

消耗于转移电阻 R_{22} 上的有功功率表达式为:

$$\Delta P_{22} = R_{22} \cdot I_{22}^2. \quad (26)$$

另外,

$$I_{22}^2 = \frac{(E' \cos \delta - U)^2 + E'^2 (\sin \delta)^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2}, \quad (27)$$

由式(23)-(27)可得电磁功率 P_{e3} 的表达式:

$$P_{e3} = \frac{X_{22}}{R_{22}^2 + X_{22}^2} E' \cdot U \cdot \sin \delta + \frac{R_{22}}{R_{22}^2 + X_{22}^2} (E'^2 - E' \cdot U \cdot \cos \delta). \quad (28)$$

式中, $R_{22} = -\frac{X_s \cdot X_L \cdot R_F}{R_F^2 + X_F^2}$, $X_{22} = X_s + X_L + \frac{X_s \cdot X_L \cdot X_F}{R_F^2 + X_F^2}$.

式(28)即为短路故障发生后串入限流器旁路阻抗 Z_F 后发电机输送至无穷大系统的有功功率表达式.图11示出了模型系统参数为 $E' = 0.95$ 、 $X_s = 0.15$ 、 $X_L = 0.08$ 、 $U = 1.0$, δ 角分别为 30° 、 60° 和 90° 时, P_{e3} 随 Z_F 的变化曲线(由上往下分别为 $\delta = 90^\circ$, $\delta = 30^\circ$, $\delta = 60^\circ$).

从图7和11中,可以看出,采用阻抗型故障限流器时,故障后发电机经 Z_{22} 向无穷功率母线输送有功功率的变化趋势与采用电抗限流和电阻限流时的大致相同,功率 P_{e3} 也是随着阻抗值 Z_F 的增大而增大,并最终趋于平稳.

分析 P_{e4} 的情况.在等效支路 Z_{20} 上的功率为:

$$S_{e4} = \frac{E'^2}{Z_{20}}, \quad (29)$$

消耗在限流电阻上的有功功率为:

$$P_{e4} = \frac{R_{20} \cdot E'^2}{R_{20}^2 + X_{20}^2}, \quad (30)$$

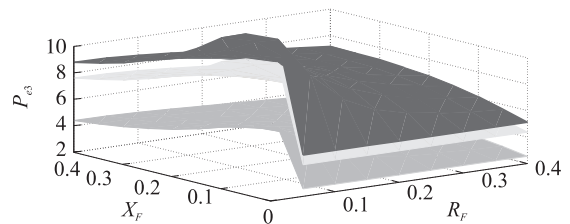

 图11 功率 P_{e3} 与限流阻抗的关系曲线

 Fig.11 Relation between P_{e3} and limiting impedance

式中, $R_{20} = \left(1 + \frac{X_S}{X_L}\right) \cdot R_F$, $X_{20} = X_S + X_F + \frac{X_S \cdot X_F}{X_L}$.

图 12 示出了相同参数条件下, P_{e4} 随 Z_F 的变化趋势.

从图 12 中,可以看出,当 Z_F 较小时, P_{e4} 随着 Z_F 的增大而增大,并在 Z_F 等于某一恒定值时出现极大值,该情况表明,无穷大系统可能要向发电机倒送有功功率来维持功率平衡;当 Z_F 继续增大时 P_{e4} 逐渐减小并趋于 0. 由此可见,采用阻抗型限流器时,其限流阻抗 Z_F 的取值要综合 P_{e3} 和 P_{e4} 的情况,慎重选择.

图 13(a)表明,当限流器阻抗值取值不当时,系统就会出现功率反送现象,也就是说, $P_{e3} + P_{e4}$ 已经超过了发电机的额定出力,转子上会产生一个极大的制动转矩而使发电机迅速减速并迫使其功角 δ 进入负值区. 如若故障没有被切除,那么发电机功角 δ 将会振荡并逐渐趋于一个稳定负值. 图 13(b)表明,当限流器阻抗值设置合理时,功率反送现象就会消除,此时,即使故障线路不被切除,无穷大系统也不会向发电机倒送有功,其功角也将振荡稳定于正值. 当故障线路切除后,发电机就会过渡到经单回线向无穷大系统输送有功功率的情况.

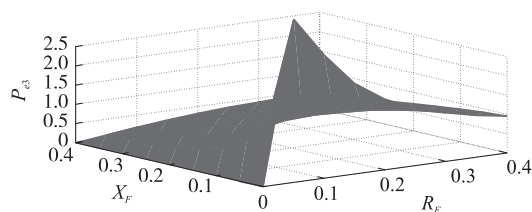


图 12 功率 P_{e3} 与限流阻抗的关系曲线

Fig.12 Relation between P_{e3} and limiting impedance

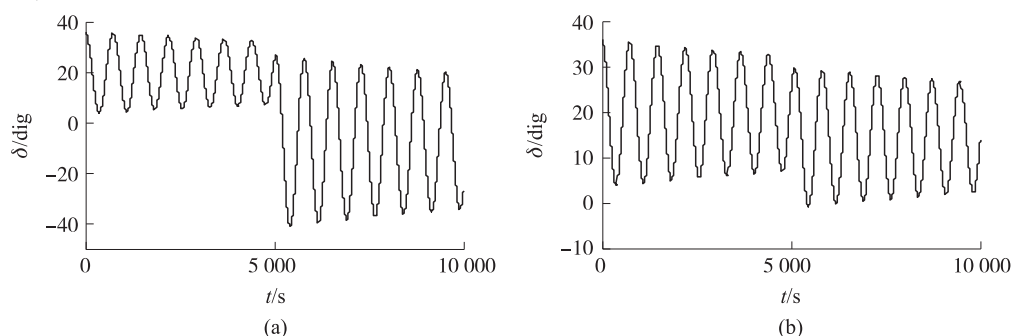


图 13 发电机功角变化曲线

Fig.13 Generator power-angle curves

5 结语

在对电力系统暂态稳定性的研究中,本文对单机无穷大系统模型进行了分析.从分析得到的结果可以看出,短路故障发生后,无论电阻型、电抗型还是阻抗型限流器的及时投入均可有利于减小发电机不平衡功率,从而改善短路故障下系统的暂态功角稳定特性,提高系统的暂态稳定裕度.且三种类型的故障限流器在改善系统暂态稳定特性的能力都与其阻抗值直接相关,一般而言,随着限流阻抗值的增加,系统的暂态稳定能力也会相应的增强,但对于一个特定的系统,限流阻抗的取值应该在满足限流指标的前提下,尽量有利于改善系统暂态稳定能力.

[参考文献](References)

- [1] 孙奇珍,蔡泽祥,李爱民,等. 500 kV 电网短路电流超标机理及限制措施适应性[J]. 电力系统自动化,2009,33(21): 92-96.
SUN Q Z, CAI Z X, LI A M, et al. Short-circuit current over-limited mechanism of 500 kV power system and the adaptability of limiting measures[J]. Automation of electric power systems, 2009, 33(21): 92-96. (in Chinese)
- [2] 刘凯,陈红坤,林军,等. 故障限流器在电力系统中应用研究现状[J]. 电力系统保护与控制,2001,38(7):147-151.
LIU K, CHEN H K, LIN J, et al. Study situation of application of fault current limiter in power system[J]. Power system protection and control, 2001, 38(7): 147-151. (in Chinese)
- [3] 陈旭. 关于建设坚强广东电网的若干建议[J]. 电网技术,2004,28(24):61-64.
CHEN X. Some suggestions on constructing strong Guangdong power network[J]. Power system technology, 2004, 28(24): 61-64. (in Chinese)

(下转第 53 页)

- TAO W Q. Recent progress of computational heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [7] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政, 蒋章焰, 译. 北京: 科学出版社, 1984.
- PATANKAR S V. Heat transfer and fluid flow in the numerical calculation[M]. ZHANG Z, JIANG Z Y, translated. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [8] SPALDING D B. A general purpose computer program for multi-dimensional one-and two-phase flow[J]. Mathematics and computers in simulation, 1981, 23(3): 267-276.
- [9] PATANKAR S V. A calculation procedure for two-dimensional elliptic situations[J]. Numerical heat transfer(Part A: Applications), 1981, 4(4): 409-425.
- [10] FERZIGER J H, PERIC M. Computational method for fluid dynamics[M]. Privacy Policy: Springer Science & Business Media, 2002.
- [11] 蒋光彪, 阳杰, 钟海, 等. 高层建筑风场数值模拟研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2015(3): 45-48.
- JIANG G B, YANG J, ZHONG H, et al. Numerical simulation on the high-rise building wind field[J]. Journal of Hunan city university(natural science edition), 2015(3): 45-48. (in Chinese)
- [12] 任立波, 韩吉田, 何海澜. 基于 FLUENT 软件信息传递模式的离散颗粒流动的并行算法[J]. 高校化学工程学报, 2015(4): 963-970.
- REN L B, HAN J T, HE H L. Parallel computing of discrete particle flows based on information communication model of FLUENT platform[J]. Journal of chemical engineering of Chinese universities, 2015(4): 963-970. (in Chinese)
- [13] 辛晓华, 张武, 周华. 基于 FLUENT 的绕流问题的数值模拟与并行计算[J]. 计算机工程与设计, 2005(8): 2 153-2 154, 2 200.
- XIN X H, ZHANG W, ZHOU H. Numerical simulation and parallel computation of flow over object using FLUENT[J]. Computer engineering and design, 2005(8): 2 153-2 154, 2200. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 23 页)

- [4] SMITH R K, SLADE P G, SARKOZI M, et al. Solid state distribution current limiter and circuit breaker: application requirements and control strategies[J]. IEEE transactions on power delivery, 1993, 8(3): 1 155-1 162.
- [5] HIROYUKI H, SHINICHI M, TANZO N, et al. Masaumi taguchi experimental study on limiting operation of superconducting fault current limiter in double circuit transmission line model system[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2002, 12(1): 691-698.
- [6] 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.
- HAO Z J, JIANG D Z, CAI Y H. Effect on novel fault current limiters on power system transient stability[J]. Automation of electric power systems, 2004, 28(8): 50-56. (in Chinese)
- [7] 时宇琳, 王宝华. 基于 Matlab 的电力系统暂态稳定仿真实验与分析[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(4): 40-43.
- SHI Y L, WANG B H. Transient stability simulation and analysis of power system based on Matlab[J]. Research and exploration in laboratory, 2010, 29(4): 40-43. (in Chinese)
- [8] SUGIMOTO S, KIDA J, ARITA H, et al. Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation[J]. IEEE transactions on power delivery, 1996, 11(2): 842-847.
- [9] 靳希, 段开元, 张文青. 电网短路电流的限制措施[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(4): 78-82.
- JIN X, DUAN K Y, ZHANG W Q. Short-circuit current limiting methods for power networks[J]. Journal of power science and technology, 2008, 23(4): 78-82. (in Chinese)
- [10] 顾雪平, 杨智龙. 故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响分析[J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(4): 22-28.
- GU X P, YANG Z L. Influence analysis of transient stability for superconducting fault current limiter on power system[J]. Journal of Hunan university of technology, 2007, 21(4): 22-28. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]