

限流器对单机无穷大输电系统的稳定性影响

龙 鹏, 霍晓玉, 孙频东

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 短路限流器在电力系统中的应用领域不断扩大, 由于在输电系统中引入了短路限流器, 即使输电系统的输电容量在不断提高, 对输电设备短路容量的提升也并不十分明显. 本文重点研究了短路限流器接入单机无穷大功率输电系统后, 在传输线发生短路时, 其等效电路及等效电路中的阻抗值, 输电线路中阻抗的变化对输出功率的影响. 研究了发生短路时, 当短路限流器为纯阻抗、纯电感和 R-L 型阻抗时, 对发电机转速及转角的影响, 对发电机功角特性曲线的影响, 对发电机无穷大功率母线系统工作稳定性的影响以及限流器自身的有功损耗问题.

[关键词] 限流器, 电力系统, 短路故障, 功角特性

[中图分类号] TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)01-0023-09

Study of the Effects of Fault Current Limiter on Stability of Transmission System

Long Peng, Huo Xiaoyu, Sun Pindong

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

Abstract: With the gradually wide application of short circuit current limiter, although the power transmission capability of power transmission system is continuously growing, the upgrading of the short circuit capacity of the transmission system is not obvious because of the introduction of short circuit current limiter in power system. This paper bases its theories on conditions that the short circuit current limiter is inserted into single machine infinite power system and that the transmission line is short-circuit. And this paper mainly studies influences on output power which are caused by the variation of equivalent circuit of the system previously referred, its impedance value and the impedance of output line. This paper also studies influences on rotational speed and angle, torque-angle curve and working stability of infinite power busbar system of the generator and problems on active loss of short circuit current limiter itself when the system is short-circuit and the short circuit current limiter is impedance pure inductance and R-L typed impedance.

Key words: fault current limiter, power system, short circuit, power angle characteristic

电力系统的安全是一个关乎各行各业的重大事情, 电网容量的不断增大、电网中短路电流水平的不断提高, 使电网中设备, 如断路器、变压器、互感器等的设计容量随之提高, 这增加了电力系统设备的成本. 为了保障电力系统的安全、稳定和可靠运行, 同时又不使设备的设计容量显著提高, 故障限流器开始被应用到电力设备中, 如前期国家电网重点资助研制的 DXK1 系列电流限流开断器^[1-2], 该限流器可被安装在发电机的出口, 以防止灾难性的短路事故; 安装在主变压器的出线口, 以防止大短路电流对变压器的冲击; 还可以与母联断路器串联使用, 以实现母线的并联运行. 另外, 浙江大学提出了变压器耦合型, 新型桥式固态限流器^[3-5], 对限流器的原理及安装位置作出了分析. 由于故障限流器的使用, 限制了电网的短路电流, 因此可以减轻断路器等高压设备的运行负担, 从而, 提高了这些设备动作的可靠性和使用寿命^[6-7]. 限流器接入系统后, 对输电系统会产生一定的影响^[8-10]. 为了能简单地说明问题, 本文主要考虑单机无穷功率电网系统发生短路故障后接入故障限流器对输电系统稳定性产生的影响.

1 输电系统的结构模型

单机无穷大功率双回路系统的结构如图1(a)所示,当系统正常运行时,短路电流限流器 FCL,如图1(b)所示,不影响输电系统的正常工作,它是一个被短路的设备.当输电系统发生短路时,短路电流限流器才被投入使用.以单机无穷大功率双回路输电系统为例,当系统短路时,检测电路检测到短路电流,短路限流器动作, S_F 被断开,限流阻抗 Z_F 接入输电系统中.在图1(b)的等效电路中, Z_F 可以是纯电感、纯电阻或是 R-L 串联的阻抗.接入不同的阻抗类型对系统的动态性能会有不同的影响.

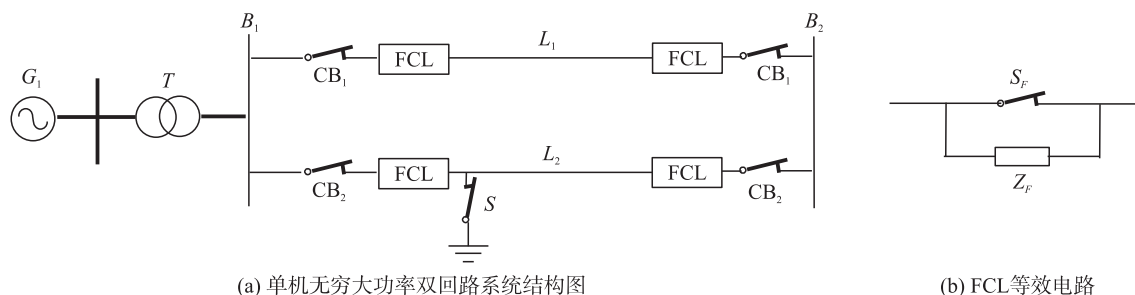


图1 单机无穷大功率系统模型

Fig.1 One machine infinite power system model

图2(a)是单机无穷功率双回路系统的故障等值电路图,图2(b)为经等效变换后的电路模型.图中的 U 为无穷功率母线上的等效电压, E' 为发电机、变压器部分的等效电势, X_s 为它们的等效阻抗,参数均为标么值,各参数间的关系如式(1)~(4)所示.

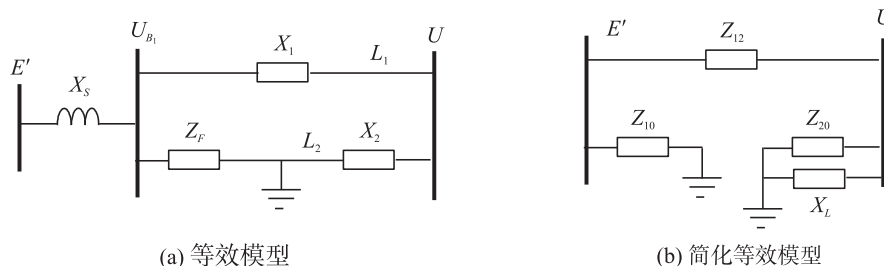


图2 故障发生后单机无穷大母线系统等值电路

Fig.2 The equivalent circuit of single machine infinite power system after the short fault

图2(a)中, $X_1=X_2=X_L$ 为线路 L_1 、 L_2 的阻抗, X_d' 为发电机的内阻抗, X_T 为变压器的漏阻抗. X_s 如式(1)所示:

$$X_s = X_d' + X_T. \quad (1)$$

图1(b)中 Z_F 为 R-L 串联的阻抗,如式(2)所示:

$$Z_F = R_F + jX_F. \quad (2)$$

则图2(b)中, Z_{12} 如式(3)所示:

$$Z_{12} = jX_s + jX_L + \frac{jX_s \cdot jX_L}{Z_F} = -\frac{X_s \cdot X_L \cdot R_F}{R_F^2 + X_F^2} + j\left(X_s + X_L + \frac{X_s \cdot X_L \cdot X_F}{R_F^2 + X_F^2}\right) = R_{12} + jX_{12}. \quad (3)$$

Z_{10} 如式(4)所示:

$$Z_{10} = jX_s + (R_F + jX_F) + \frac{jX_s(R_F + jX_F)}{jX_L} = \left(1 + \frac{X_s}{X_L}\right)R_F + j\left(X_s + X_F + \frac{X_s \cdot X_F}{X_L}\right) = R_{10} + jX_{10}. \quad (4)$$

取 $X_L=0.08$, $X_s=0.105$ 时,阻抗 Z_{10} 、 Z_{12} 随自变量 R_F 和 X_F 变化曲线如图3所示.

从图3(a)中可以看出,当短路限流器为 R-L 串联型阻抗时, Z_{10} 的值随着 R_F 、 X_F 值的增大而增大.从图3(b)中可以看出, Z_{12} 的值随着 R_F 、 X_F 值的增大而迅速减小并趋向稳定.

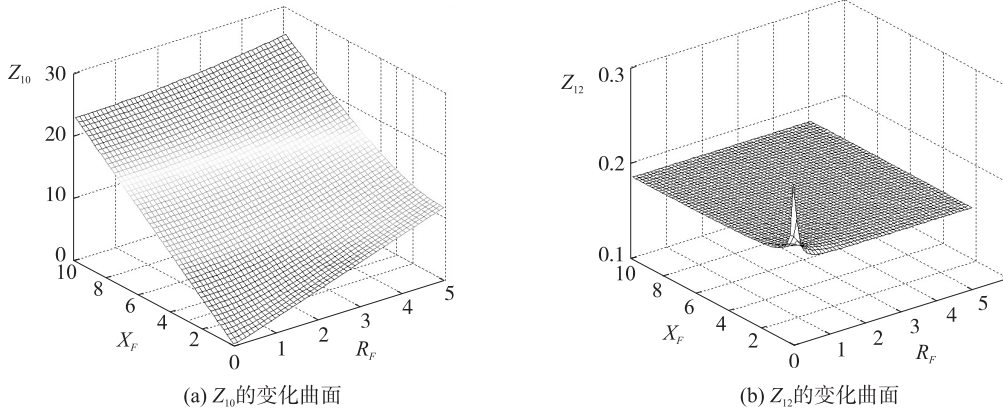

 图3 阻抗 Z_{10} , Z_{12} 与 R_f 和 X_f 的关系曲线

 Fig.3 Relation among impedance Z_{10} , Z_{12} and R_f and X_f

2 单机无穷大系统的功率分析

在如图 1 所示的系统中,假设短路故障发生在传输线 L_2 的近始端,随后限流器被快速串入输电系统,此时系统的等效电路如图 2 所示,发电机和无穷大电网通过 Z_{12} 相连,它们之间的向量图如图 4 所示。

从向量图可知,发电机注入电网的功率如(5)式所示:

$$S_{e1} = \frac{E' - U}{R_{12} + jX_{12}} \cdot U = \frac{(E' \cos \delta + jE' \sin \delta - U)(R_{12} - jX_{12})}{R_{12}^2 + X_{12}^2} \cdot U. \quad (5)$$

式(5)中的有功分量如式(6)所示:

$$P_{e1}' = \frac{X_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} E' U \sin \delta + \frac{R_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} (E' U \cos \delta - U^2). \quad (6)$$

消耗于 R_{12} 上的功率为:

$$\Delta P_{e1} = R_{12} I_{12}^2 = \frac{R_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} (E'^2 - 2E' U \cos \delta + U^2). \quad (7)$$

设 P_{e1} 为串入短路限流阻抗后,发电机经由等效支路 Z_{12} 送至无穷大电网的有功功率和消耗于该支路电阻上的有功功率之和,其值如(8)式所示:

$$P_{e1} = P_{e1}' + \Delta P_{e1} = \frac{X_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} E' U \sin \delta + \frac{R_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} (E'^2 - E' U \cos \delta). \quad (8)$$

发电机在等效支路 Z_{10} 上消耗的功率为:

$$S_{e2} = \frac{E'^2}{Z_{10}}. \quad (9)$$

因此,在 Z_{10} 支路上消耗的有功功率为:

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

发电机输出的总有功功率如式(11)所示:

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = \frac{X_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} E' \cdot U \cdot \sin \delta + \frac{R_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} (E'^2 - E' \cdot U \cdot \cos \delta) + \frac{R_{10} E'^2}{R_{10}^2 + X_{10}^2}. \quad (11)$$

图 5 示出了模型系统参数为 $E' = 0.946$, $U = 1.0$, $X_s = 0.105$, $X_L = 0.08$, δ 角分别为 30° 、 60° 时 P_e 随 R_f , X_f 的变化趋势。

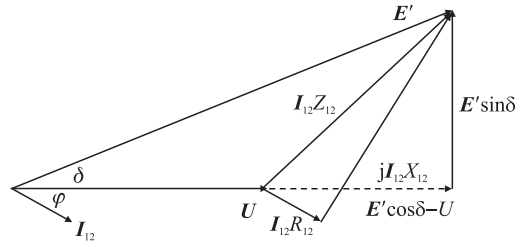
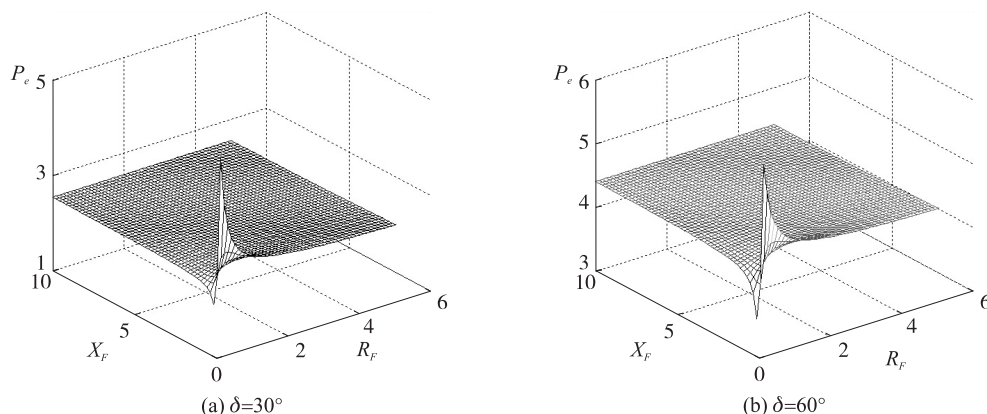

 图4 E' , U , I_{12} 和 Z_{12} 之间的向量图

 Fig.4 Vector diagram between E' , U , I_{12} and Z_{12}

图5 功率 P_e 与限流阻抗的关系曲线Fig.5 Relation between power P_e and impedance of FCL

从图5中,可以看出,当 R_f 、 X_f 取较小值时, P_e 会出现极小值(此时 $P_e \approx 1.25$).当 X_f 取较小值时, P_e 随着 R_f 的增大先增大后减小并趋向于平稳.当 R_f 取较小值时, P_e 随着 X_f 的增大而增大,并趋向于平稳.当 P_e 出现极大值时已远远超过发电机的额定出力(2.4),这时发电机将会因其输入的机械功率远小于需要输出的电磁功率 P_e 而使得无穷大系统向发电机倒送有功来维持有功功率平衡.

上述分析表明,采用R-L型阻抗限流器时,限流电阻 R_f 和限流电抗 X_f 对系统暂态稳定的影响很大,适当的取值可以有效消耗发电机的过剩功率,从而有利于系统的暂时稳定;但若取值不当,就有可能造成系统向发电机倒送有功功率以弥补其功率严重缺失的不良后果.因此,采用R-L型阻抗限流器时,限流电阻 R_f 和限流电抗 X_f 的取值要慎重选择.

3 单机无穷大系统的稳定性分析

在输入机械功率 P_T 不变的情况下,输电系统发生三相短路,使发电机输送到无穷大功率母线的功率显著减小,原功率平衡被打破,发电机有可能失步.接入故障限流器后有可能改善这一情况.

3.1 单机无穷大功率系统的动态模型

在短路故障发生前,系统正常运行时,如果忽略风阻、摩擦等损耗(不考虑阻尼),发电机的转子运动方程如式(12)所示,发电机输出功率如式(13)所示:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega_* - 1)\omega_0, \\ \frac{d\omega_*}{dt} = \frac{1}{T_j}(P_T - P_e). \end{cases} \quad (12)$$

$$P_e = \frac{E'U}{X} \sin \delta. \quad (13)$$

式(12)中, δ 为发电机 q 轴和以同步电角速度旋转的参考相量之间的夹角, ω_* 为 ω 的标么值, ω 为发电机 q 轴的电角速度, T_j 为在发电机转子加额定转矩后,转子从 $\omega_* = 0$ 到 $\omega_* = 1$ 时所经过的时间,即发电机组的惯性时间常数, ω_0 为同步电角速度, P_T 为输入的机械功率, P_e 为发电机发出的电磁功率, X 为发电机到无穷大功率母线的电抗, U 为无穷大功率母线的电压, E' 为发电机的等效电势,均以标么值表示.将式(12)和式(13)用结构框图,可表示成图6所示.框图中的 D 为发电机的阻尼因子, δ_0 为以度为单位的夹角.

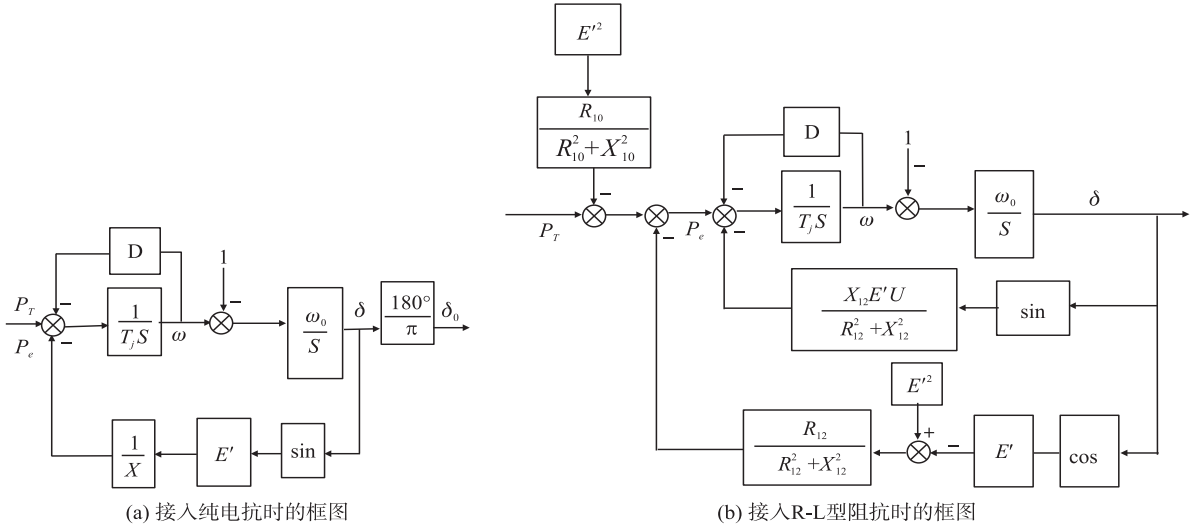


图6 纯电抗和R-L型阻抗时的功率摇摆曲线求取框图

Fig.6 Resolving block diagram to power rocking curve of pure impedance and R-L typed impedance

设在发生三相短路故障时,接入的限流器中只含电抗分量,则式(13)中, X 值可以分别表示为下列各典型值,如式(14)所示:

$$\begin{cases} X_I = X_S + \frac{1}{2} X_L, \\ X_{II} = X_S + X_L, \\ X_{III} = X_S + X_L + \frac{X_S \cdot X_L}{X_F} = X_S + \left(1 + \frac{X_S}{X_F}\right) X_L, \\ X_{IV} = \infty. \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中, X_I 为系统正常运行时的电抗值, X_{II} 为系统故障母线 L_2 被切除后系统的电抗值, X_{III} 为系统故障母线未被切除,但母线始端串入限流器后的电抗值, X_{IV} 为系统母线 L_2 短路但又未串入限流电抗时的阻抗.它们之间有关系如式(15)所示:

$$X_I < X_{II} < X_{III} < X_{IV}. \quad (15)$$

在(14)式的 X_{III} 表达式中, X_{III} 是 X_S, X_F, X_L 的函数,考虑到 X_S 值的相对影响较小故将其作为参数,分别取 X_S 值为0.08,0.24时, X_F, X_L 对阻抗 X_{III} 值的影响如图7所示.

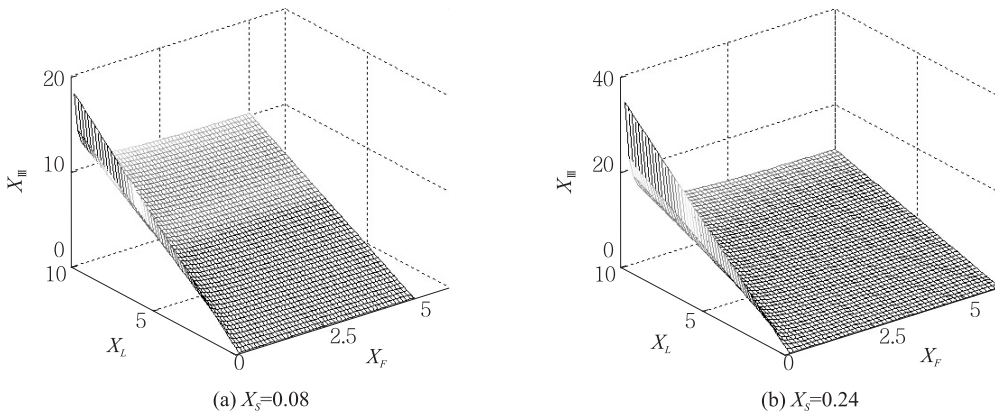

 图7 线路阻抗对 X_F, X_L 变化的关系曲线

 Fig.7 Relation between line impedance and X_F and X_L

从图7可以看出,当 X_F 取值较小时, X_{III} 随 X_L 增大而增大且有较大值,当 X_F 取值较大时, X_{III} 也随 X_L 增大而增大但取值小于前者. X_{III} 随着 X_F 增大而逐渐减小,并趋向于稳定,且在 X_L 取值增大时, X_{III} 随着 X_F 增大而减小的程度也在增加.

3.2 单机无穷大功率系统的功角特性曲线

将(13)式中的 X 取不同值时,可画出功角特性曲线如图 8(a)所示. 图 8(a)中曲线(1)为系统正常运行时的功角曲线;曲线(2)为发生短路,故障线路被切除后的功角曲线;曲线(3)为发生短路,接入短路限流器后的功角曲线,这里限流器为纯电抗;曲线(4)为发生短路,未接入短路限流器的功角曲线. 区域 I 为发生短路故障,线路中串入限流器后的发电机加速面积. 区域 II 为响应的减速面积. 从图中可见区域 II 的面积大于区域 I 的面积,所以该系统是能够达到稳定状态的. 在图 8(b)中,曲线(1)的意义同图 8(a),曲线(2)为发生三相短路,接入短路限流器后的功角曲线,这里短路限流器为 R-L 阻抗型的. 因此,发电机功率如式(11)所示. 串入限流器后,发电机的输出功率不但没有减小反而增大,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(2)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 8(c)的曲线(2)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 8 可见系统的稳定裕量是比较大的.

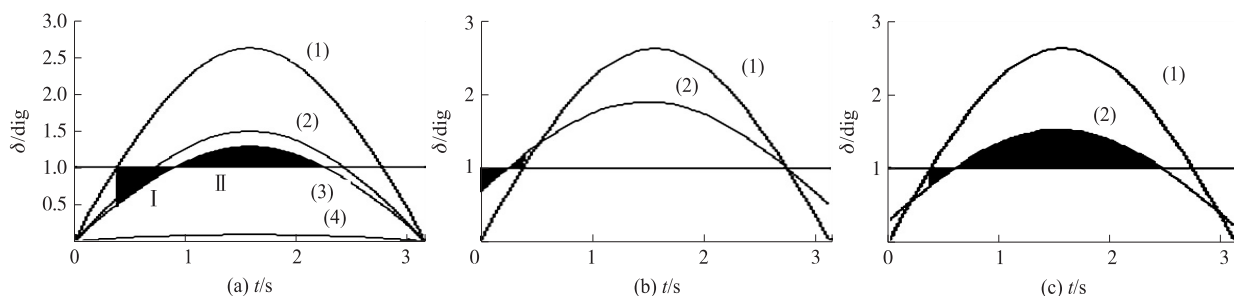


图 8 不同限流阻抗下的功角变化曲线

Fig.8 Power-angle curves under different current limiting impedance

3.3 串入限流电抗后发电机的功角曲线

为研究发电机的功角特性曲线,选定系统参数如下,发电机容量 300 MVA,功率因数 0.85,发电机电抗标么值 0.05,发电机惯性时间常数 $T_J=6$ s,发电机定子电阻近似为 0. 电力系统频率 50 Hz,变压器漏抗 $X_T=0.05$,输电线电抗 $X_L=0.04 \Omega/\text{km}$. 对图 5 所示的系统进行仿真.

(1) 忽略发电机阻尼的情况

在忽略发电机阻尼后,系统正常运行时,发电机的转速和功角曲线在平衡点附近小幅度等幅振荡,仿真波形如图 9 所示.

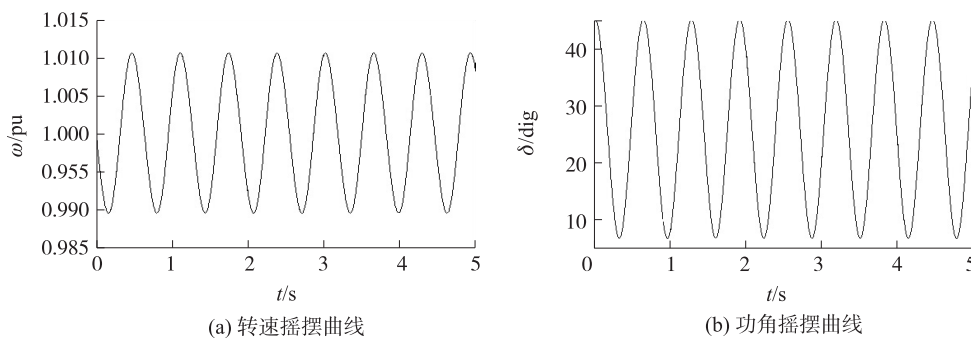


图 9 忽略发电机阻尼,系统正常运行时的发电机转速和功角曲线

Fig.9 Generator speed and power-angle curves neglecting the damping force of the generator during normal operation of the system

对于无阻尼的发电机系统,在发生三相短路故障并且串入限流器之后,由于线路的等效阻抗增加,使得发电机的功角特性曲线最大值下降,若原动机的输出功率保持不变,发电机的转子将加速,以维持功率的平衡. 这时转速和功角的摆动会明显增加,如图 10 所示.

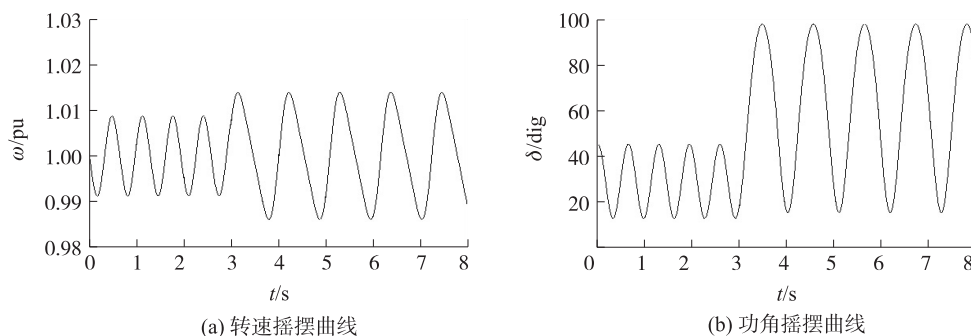


图 10 忽略发电机阻尼,系统发生短路故障,接入限流器后发电机转速和功角曲线

Fig.10 Generator speed and power-angle curves neglecting the damping force of the generator and the system has short-circuit fault and is accessible to current limiter

(2)考虑有阻尼的情况

如果考虑发电机的阻尼,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,波形如图 11 所示。

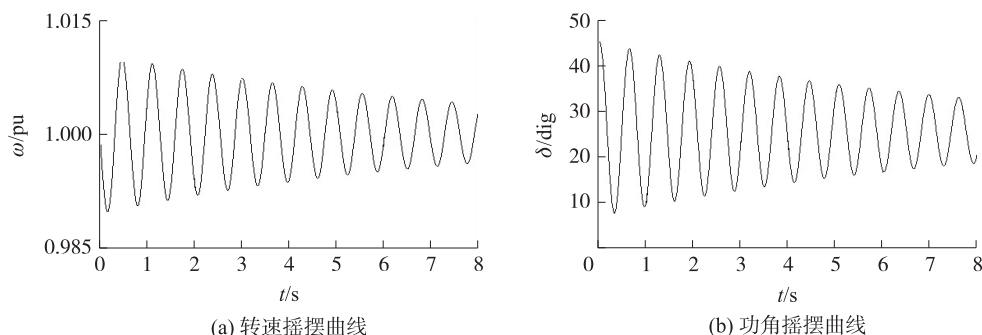


图 11 考虑发电机阻尼,系统正常运行时的发电机转速和功角曲线

Fig.11 Generator speed and power-angle curves considering that the damping force of the generator during normal operation of the system

在考虑发电机的阻尼情况下,当系统发生三相短路故障并快速接入故障限流器后,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,这使得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,其波形如图 12 所示。

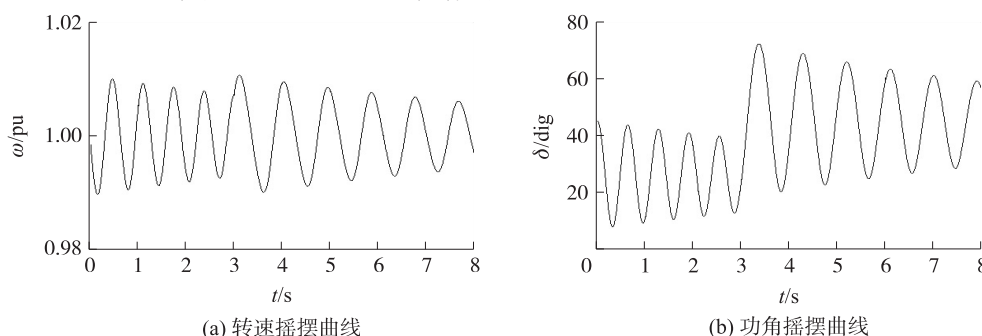


图 12 考虑发电机阻尼,系统发生短路故障,接入限流器后的转速和功角曲线

Fig.12 Generator speed and power-angle curves considering that the damping force of the generator and the system has short-circuit fault and is accessible to current limiter

值得一提的是,对于有阻尼系统,限流器中的阻抗选择范围更宽,根据“等面积规则”有阻尼的系统在选择限流电抗时的范围将更大。

(3)限流器由纯电阻构成的情况

取 $X_f=0$ pu, $R_f=0.8$ pu, $P_f=1.1$ pu. 单机无穷大功率系统的转速、功角摇摆曲线如图 13 所示。从图中可见故障发生串入限流电阻后,功角摆角局部出现负值,即出现功率反送现象。

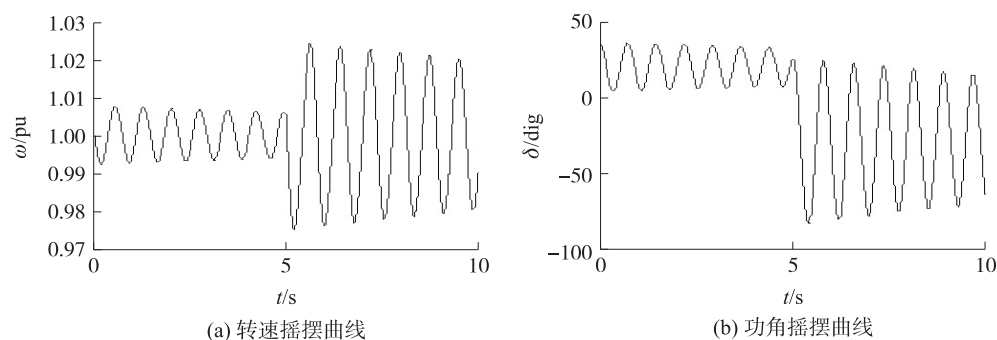


图13 限流器位纯电阻,系统发生短路故障,接入限流器后的功角曲线

Fig.13 Generator speed and power-angle curves considering that the system has short-circuit fault and is accessible to current limiter which is regarded as pure impedance

(4) 限流器由 R-L 型阻抗构成的情况

取 $X_f=0.6$ pu, $R_f=0.6$ pu, $P_T=1.1$ pu. 单机无穷大功率系统的转速、功角摇摆曲线如图 14 所示,也具有功率反送现象.

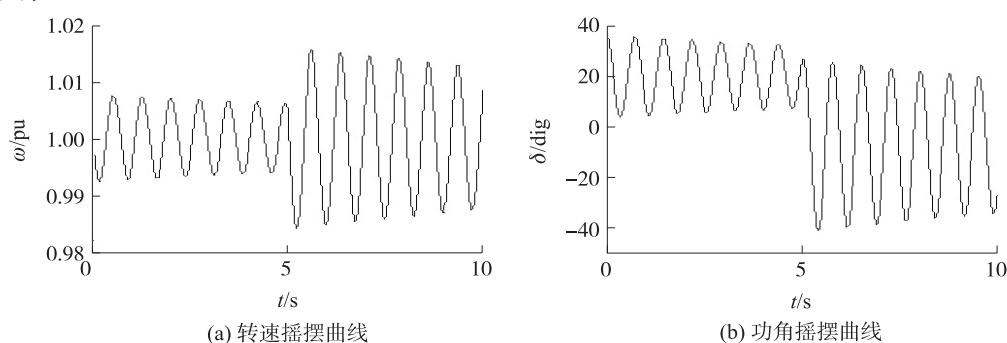
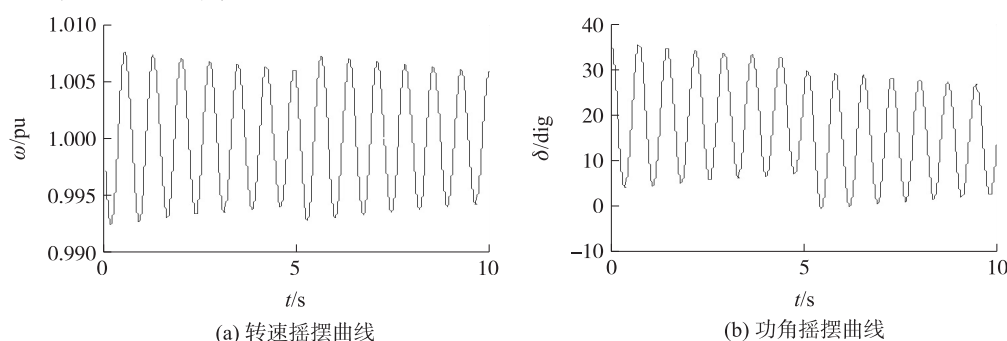


图14 限流器为 R-L 型阻抗,系统发生短路故障,接入限流器后的转速和功角曲线

Fig.14 Generator speed and power-angle curves considering that the system has short-circuit fault and is accessible to current limiter which is regarded as R-L typed impedance

(5) 功率反送现象的消除

取 $X_f=3.0$ pu, $R_f=5.0$ pu, $P_T=1.1$ pu 时,单机无穷大功率系统的转速、功角摇摆曲线如图 15 所示,这时基本消除了功率反送的现象,转速摇摆也无太大变化.

图15 系统发生短路故障,接入限流器后 $\delta > 0$ 时的转速和功角曲线Fig.15 Generator speed and power-angle curves considering that the system has short-circuit fault and is accessible to current limiter on condition that $\delta > 0$

4 结论

在输电系统中串接短路限流器能降低对系统中设备的短路容量要求,能减小短路故障的影响面,能使短路线路外的其它输电线继续有效地工作. 串入短路限流器后,能使系统的稳定性得到改善,通过改变限流器阻抗值的大小或阻抗的角度,可以将功角特性上输入机械功率大于电功率输出部分的加速面积得

到压缩,使系统的稳定裕量得到提升,使系统的转速和功角摆动变小,让多余的机械功率消耗到限流电阻中,或暂存在限流电抗器中。

[参考文献](References)

- [1] 孙树敏,刘洪顺,李庆民,等. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术,2008(21):75-79.
SUN S M, LIU H S, LI Q M, et al. A summarization of research on fault current limiter of power system[J]. Power system technology, 2008(21): 75-79.(in Chinese)
- [2] 李明,张小青. 电力系统故障限流器技术的研究[J]. 电气时代,2005(4):54-56.
LI M, ZHANG X Q. The research on fault current limiting technology of power system[J]. Electric age, 2005(4): 54-56. (in Chinese)
- [3] 蔡永华,江道灼,吴兆麟,等. 新型固态限流器控制系统的研制[J]. 电力系统自动化,2004,28(7):62-66.
CAI Y H, JIANG D Z, WU Z L, et al. Study on control system of the three phase solid state fault current limiter[J]. Automation of electric power systems, 2004, 28(7): 62-66.(in Chinese)
- [4] 陈刚,江道灼,吕征宇,等. 一种新型固态短路限流器拓扑及其控制策略[J]. 电力系统自动化,2004,28(3):32-38.
CHEN G, JIANG D Z, WU Z Y, et al. Research and development of solid state fault current limiter[J]. Automation of electric power systems, 2003, 27(10): 89-94.(in Chinese)
- [5] LEUNG E M, RODRIGUEZ A, ALBERT G W, et al. High temperature superconducting fault current limiter development[J]. Trans on applied superconductivity, 1997(7):985-988.
- [6] 张艳丽,费万民,吴勤. 基于单可控开关的短路故障限流器[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):46-50.
ZHANG Y L, FEI W M, WU Q. Fault current limiter based on single controllable switch[J]. Electric power automation equipment, 2009, 29(8): 46-50.(in Chinese)
- [7] 崔新欣. 单自关断开关管桥式断路故障限流器拓扑与控制策略[D]. 南京:南京师范大学,2013.
CUI X X. Since the cut-off switch pipe bridge type circuit fault current limiter topology and control strategy [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.(in Chinese)
- [8] 谭凌云,吴兆麟. 桥式固态短路限流器在电网中的应用研究[J]. 电力系统自动化,2000,24(18):41-44.
TAN L Y, WU Z L. Application research of bridge type solid state current limiter on power system[J]. Automation of electric power systems, 2000, 24(18): 41-44.(in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)

[责任编辑:陈 庆]