

汽门快关的开启时刻对系统稳定性影响的研究

袁宇春 张保会 西安交通大学电力工程系 (710049)

【摘要】 汽门快关是提高系统暂态稳定的有力措施之一。大量的研究发现,快关汽门在保持系统首摆稳定的同时,可能引起后续摇摆的失稳。基于能量函数法,分析了快关引起后续摇摆失稳的原因是汽门不合适的开启时刻,并从有利于系统稳定的角度提出了确定汽门最佳开启时刻的方法。汽门最佳开启时刻满足的条件是,开启后系统的暂态能量最小。

【关键词】 快关汽门 暂态稳定 暂态能量

前言

快关汽门可以有效提高第一摇摆的稳定性,但是在联系薄弱的系统中可能引起后续摇摆的失稳。一般文献认为,后续摇摆失稳是由于汽门关闭时间过长而出现了“过制动”现象。本文通过对单机无穷大系统在快关过程中能量函数的分析,指出“过制动”并不是引起后续摇摆失稳的主要原因,由于汽门不合适的开启时刻使开启后系统的暂态能量超过系统的稳定域造成系统后续摇摆失稳。

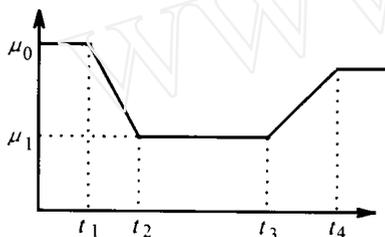


图1 快关过程

汽门快关的过程如图1所示。图中 μ_0 为最初汽门的开度,对应于机械功率 P_T , μ_1 为快关后汽门的开度,对应于机械功率 P_{T2} , t_1 是延时, $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ 为关闭时间, $\Delta t_3 = t_3 - t_2$ 为关闭持续时间, $\Delta t_4 = t_4 - t_3$ 为开启时间。

文献^[1]通过大量的仿真计算,认为以上各时间的不同对系统稳定性的影响不同。文中得出结论,尽管快关能有效减小功角在第一摇摆中的振荡,但可能引起第二摆的失稳。并对于一

个实际的系统给出了在保持系统首摆及后续摇摆稳定的前提下,以上各时间的取值范围。文^[2]介绍了快关对系统稳定的好处,认为 t_1 和 t_2 的大小对首摆的稳定起主要影响。文中还分析了快关过程对锅炉、汽机等影响。文^[3]研究了快关过程对稳定性的影响,分析得出快关引起后续摇摆失稳的主要原因是汽门开启的时刻不合适,但是文中没有从理论上解释引起后续摇摆失稳的原因,也没有给出寻找汽门合适开启时刻的方法。

本文利用单机无穷大系统的暂态能量函数,建立了分析汽门开启时刻对系统稳定性影响的数学模型。利用该模型,可以解释不合适的汽门开启时刻造成系统后续摇摆失稳的原因是,在这一时刻开启汽门后系统的暂态能量较大,超过了系统的稳定域,从而得出汽门最佳开启时刻满足的条件是,汽门开启后系统的暂态能量最小。

1 分析汽门开启时刻对系统稳定影响的数学模型

单机无穷大系统的能量函数为^[4]:

$$V = \frac{1}{2} M \omega^2 - P_T (\delta - \delta_S) - P_e (\cos \delta - \cos \delta_S) \quad (1)$$

式中 M 为发电机的惯性时间常数, P_T 为机械功率, δ 为发电机功角, δ_S 为发电机功角的稳定平衡点, $\omega = \frac{d\delta}{dt}$ 。

系统发生故障期间,由于发电机输入机械

1997—10—20 收稿

功率与输出的电磁功率不平衡,发电机加速获得能量,设故障切除时的能量值为 V_C 。如果故障切除后没有其它操作,系统的能量保持 V_C 。当 V_C 大于系统稳定域时,系统将失去稳定。假设 t_1 时刻快关动作,则在 t_1^- 时刻系统的暂态能量为(以下推导中均考虑了角度和角速度不能突变的性质,即 $\omega_i^+ = \omega_i^-, \delta_i^+ = \delta_i^-$):

$$V_{i1}^- = \frac{1}{2} M\omega_{i1}^2 - P_T(\delta_{i1} - \delta_S) - P_e(\cos\delta_{i1} - \cos\delta_S) = V_C \quad (2)$$

设机械功率的变化过程与汽门开度的变化过程相同,也按图 1 的方式变化。图 1 中 t_2 时刻系统的暂态能量与汽门的关闭时刻及关闭时间有关。本文研究 t_1 和 t_2 一定的条件下汽门开启时刻对后续摇摆稳定的影响,所以设 t_2 时刻的暂态能量为 V_{C2} 。在 t_2 和 t_3 期间,机械功率不变,系统中没有其它扰动,以这种情况下系统的稳定平衡点为参考时,系统的暂态能量是不变的,所以 t_3^- 时刻系统的暂态能量值 V_{C2} 。下面推导 t_4 时刻系统暂态能量的表达式。

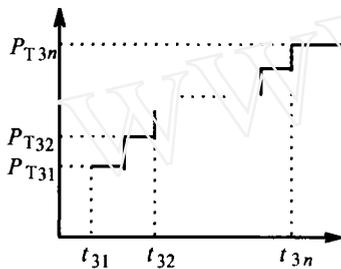


图 2 机械功率的拟和线

将图 1 中 t_3 和 t_4 之间汽门开度变化的过程用 n 个折线段来表示,则机械功率的变化过程也可用相同的折线来表示,图 2 所示为用 n 段折线来表示 t_3 和 t_4 之间机械功率的变化。图 2 中: $P_{T31} = P_{T2}, P_{T3n} = P_{T4}$, 它们的大小决定于 t_3 和 t_4 时刻汽门的开度, $t_{31} = t_3, t_{3n} = t_4$ 。

由前面可知, $V_{i31}^- = V_{C2}$, 设 t_{31}^+ 时刻机械功率由 P_{T31} 变为 P_{T32} , 则 t_{31}^+ 时刻系统的暂态能量可表示为:

$$V_{i31}^+ = V_{i31}^- + P_{T31}(\delta_{i31} - \delta_{S31}) + P_e(\cos\delta_{i31} - \cos\delta_{S31}) - P_{T32}(\delta_{i31} - \delta_{S32}) - P_e(\cos\delta_{i31} - \cos\delta_{S32}) \quad (3)$$

在 t_{31}^- 和 t_{31}^+ 期间,机械功率不变,稳定平衡点也不变,当系统的暂态能量以此时的稳定平衡点为参考时是不变的,所以 $V_{i32}^- = V_{i31}^+$ 。用相同的推导方法,并考虑到 $V_{i31}^- = V_{C2}$, 可推导出 t_{3n} 时刻,也即 t_4 时刻的能量可表示为:

$$V_{i4} = V_{C2} + (P_{T2}\delta_{i3} - P_{T4}\delta_{i4}) + \sum_{i=1}^{n-1} P_{T3i}(\delta_{i3(i+1)} - \delta_{i3i}) + (P_{T4}\delta_{S4} - P_{i2}\delta_{S2}) + P_e(\cos\delta_{S4} - \cos\delta_{S2}) \quad (4)$$

式(4)中, V_{C2} 的值由汽门关闭的时刻及关闭过程决定,在汽门关闭的时刻和关闭过程一定的条件下是一常数。最后两项的值由汽门重新开启前后的机械功率和系统的稳定平衡点决定,与开启时刻无关。其余两项的值与汽门开启前后的功角有关。

在汽门关闭期间,不考虑阻尼等因素时功角的振荡周期是不变的,当汽门的开启时间一定时, δ_{i4} 与 δ_{i3} 之间存在映射关系,所以式(4)值的大小决定于汽门开启时的功角 δ_{i3} , 也即决定于汽门开启的时刻。如果汽门开启时刻选择的好,使得式(4)取得了极小值,且当式(4)的值在系统稳定域内时,系统的后续摇摆是稳定的。反之,如果汽门的开启时刻选择的不好,使得式(4)取到极大值或一个较大的值,且此值超出了系统的稳定域,则后续摇摆将失去稳定。由此可见,当汽门的关闭过程与开启过程一定时,系统后续摇摆的稳定性决定于汽门的开启时刻。

由于功角周期性变化,(4)式的极值也是周期性出现的,而且这一周期的大小与汽门关闭期间功角的振荡周期相同。计算中也发现,若在某一较好的时刻 t_x 开启汽门,系统将是稳定的,随 t_x 的增大,系统将失去后续摇摆的稳定,但是当 t_x 增大到一定值时,系统又会是稳定的。仿真结果以及对式(4)的分析均说明,系统后续摇摆的稳定性与汽门关闭的时间长短没有直接联系,即“过制动”现象并不是造成系统后续摇摆失稳的真正原因,系统后续摇摆的稳定性取决于汽门的开启时刻。

2 仿真结果

2.1 单机无穷大系统的仿真

对于单机无穷大系统,以其中一回联络线首端发生两相接地故障为例,发电机采用经典模型,不考虑阻尼。在这种故障下,不采用快关时系统将失去稳定(见图3)。

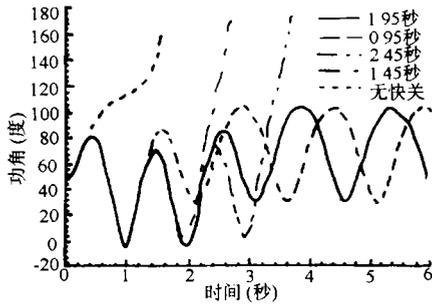


图3 单机无穷大系统功角的摇摆曲线

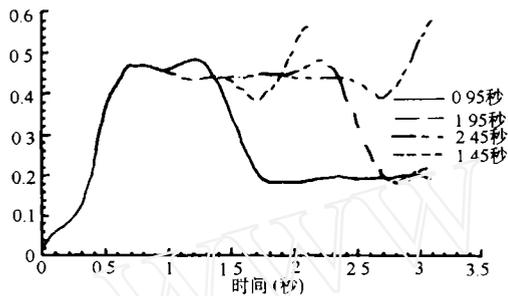


图4 能量曲线

对于采用快关的情况,本文计算了4种不同的快关控制时间下系统的稳定性。算例采用持续快关,汽门关闭后的开度 $\mu_1 = 0.5$,重新开启后汽门的开度为0.85。计算中对于4种情况取相同的关闭时间和开启时间,即 $\Delta t_2 = t_2 - t_1 = 0.3s$ ($t_1 = 0.1s, t_2 = 0.4s$), $\Delta t_4 = t_4 - t_3 = 0.7s$ 。表1为各种情况下的快关控制时间及系统的稳定情况。图3为不采用快关和各种快关控制时间下系统的功角振荡曲线。由表1和图3可见,在关闭时间 Δt_2 和开启时间 Δt_4 一定时,当 t_3 为0.95s和1.95s时系统的后续摇摆是稳定的,而当 t_3 为1.45s和2.45s时,系统在汽门开启后的第一个摇摆中失去稳定。图4为不同时刻开启汽门时系统的能量曲线。由图4可见,在0.95s和1.95s开启汽门,开启后系统的能量远

小于在1.45s和2.45s开启汽门后系统的能量。

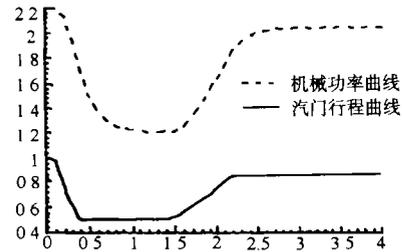


图5 单机无穷大系统中汽门的行程曲线和机械功率的变化曲线

表1 单机无穷大系统中几种快关的时间

	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_4 (s)	稳定情况
1			无快关		失稳
2	0.10	0.40	0.95	1.65	稳
3	0.10	0.40	1.45	2.15	失稳
4	0.10	0.40	1.95	2.65	稳
5	0.10	0.40	2.45	3.15	失稳

图5为快关控制过程中汽门的行程曲线和机械功率的变化曲线(图5是以1.45s开启汽门的算例画出的)。

另外,由图3还可以看出,对于单机无穷大系统,汽门关闭期间功角的振荡周期约为1s,计算表明,汽门最佳开启时刻出现的周期也约为1s。下面将通过多机系统的仿真来说明在多机系统中也有类似的结论。

2.2 多机系统的仿真

以西北系统中的某电厂为例,该系统有46台发电机,239个节点。研究电厂通过两回线接入系统,我们以其中一回线首端发生三相永久性故障为例。不采用快关控制时该电厂将与系统其余发电机失去暂态稳定,图6是该电厂发电机相对于某大电厂发电机的功角曲线。对于

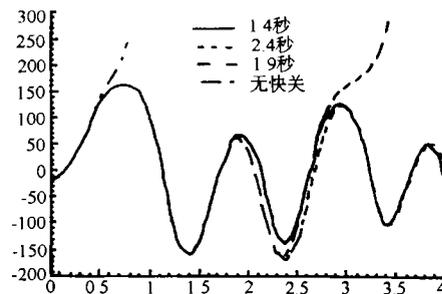


图6 多机系统中功角的曲线

采用快关的情况,本文计算了三种快关的控制时间下系统的稳定性,结果如图6。表2为几种快关的控制时间。由图6和表2可见,在多机系统中也有类似与单机无穷大系统的结论。

表2 多机系统中几种快关的时间

	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	$t_4(s)$	稳定情况
1		无快关			失稳
2	0.10	0.50	1.4	2.0	稳
3	0.10	0.50	1.9	2.5	失稳
4	0.10	0.50	2.4	3.0	稳

3 结论

“过制动”并不是造成系统后续摇摆失稳的真正原因。本文用单机系统的能量函数建立了分析快关引起后续摇摆失稳的数学模型,得出在汽门的关闭时间($\Delta t_2 = t_2 - t_1$)和开启时间($\Delta t_4 = t_4 - t_3$)一定的情况下,快关引起后续摇摆失稳的主要原因是汽门不合适的开启时

刻。在不合适的时刻开启汽门,系统的暂态能量较大,超出了系统的稳定域,引起系统后续摇摆的失稳。汽门的最佳开启时刻满足的条件为,汽门开启后系统的暂态能量为最小,这一最佳时刻是周期性出现的,其出现的周期与汽门关闭期间发电机功角的振荡周期相同。

参考文献

- 1 Prabhaskar Kundur, James P Bayne. A study of early valve actuation using detailed prime mover and power system simulation. IEEE on PAS, 1975, PAS - 94 (4): pp. 1275.
- 2 Edwards L, Gregory J D. Turbine fast valving to aid system stability: benefits and other considerations. IEEE Trans. 1986, PWRS - 1(1), pp. 143.
- 3 曹全喜,于达仁等.快关汽门对电力系统暂态稳定性影响的研究.全国高校电力系统及自动化专业第九届学术年会论文集.重庆:1993.
- 4 夏道止主编.电力系统分析(下册).水利电力出版社,1995.

THE INFLUENCE OF FAST VALVING OPENING TIME ON SYSTEM STABILITY

Yuan Yizhun, Zhang Baohui (Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract Fast valving is one of the important methods to improve system transient stability. Many studies show that fast valving may cause system lost stability in following swing although it can keep system stable in the first swing. In this paper, the transient energy function is used to analyze the reason of the system lose stability after fast valving, and proposed a method to determine the optimal opening time of fast valving. The transient energy of the system is minimum when opening at the optimal time.

Keywords Fast Valving Transient Stability Transient Energy

广东“九五”加快“电能”扩容建设 国际能源交流大会今年五月在穗举行

为了配合华南地区高速发展的能源工业建设,中国国际能源应用技术交流大会将于1998年5月在广州召开。大会由国家科委工业司、中国能源研究会、广东省人大城建环资委、省建委、省科委、省计委能源处、省经委能源处、省科委能源中心、省环保局、省电力集团总公司、电机工程学会、省能源研究会、香港工程师学会等能源(电力)主管机构共同主办;《世界能源导报》、《国际电力》、《中国电力》、《新能源》、《中国能源》、《电力情报》、《发电设备》、《节能》、《能源研究与利用》等全国89家能源报刊媒体联合协办。

与学术交流会同期举行的有“电力技术及设备”、“节能与环保技术及设备”、“新能源技术及设备”、“燃气技术及设备”四个专题展览会。届时将吸引来自美国、英国、法国、德国、日本、澳大利亚、加拿大、荷兰、以色列、韩国、中国等二十多个国家及地区的近三百家国际能源巨人参展,将集中展示当今世界在能源(电力)开发和应用方面的最高科技与先进设备。预计大会开幕期间将有四万能源界中外人士到场参加技术交流及商贸活动。中国国际能源应用技术交流大会,是近年来我国南方在能源工业建设领域规模最大、技术档次最高的一次专业科技盛会。(组委会:020—83549367)