

用能量函数分析控制时刻对系统稳定性的影响

袁宇春 张保会 西安交通大学电力工程系 (710049)

【摘要】 介绍了一种用能量函数法分析电力系统网络操作时刻对系统稳定性影响的思想方法。建立了分析网络操作最佳时刻的数学模型。从有利于系统稳定的角度提出了网络操作最佳时刻的确定原则是,操作完成后系统的暂态能量最小。

【关键词】 暂态能量 网络操作 最佳时刻

前言

能量函数法作为快速计算电力系统暂态稳定的方法之一,受到广泛重视。能量函数法的基本思想是^[1],对于给定的故障,首先求出系统的临界能量,然后计算出系统在故障切除时的暂态能量,当此暂态能量的值大于系统临界能量时,系统将失去暂态稳定。一般来说,暂态能量越小,系统的稳定性越好。

一般乒乓式控制系统的控制效果由其控制地点、控制量和控制时刻决定。目前,对电力系统各种不连续的乒乓控制的研究,大多是研究控制地点和控制量,而对控制时刻研究较少。本文通过分析研究表明,在控制地点和控制量一定时,不同的控制时刻对控制效果也有很大影响。通过优化控制时刻来提高控制效果是较经济的手段。

研究控制结束后系统的稳定性也就是研究控制结束后系统微分方程解的稳定性。微分方程解的稳定性与其初值是有关的,暂态能量函数是可以描述初值与系统稳定性关系的数学表达。对于控制完成后的系统,其初值是控制结束时刻系统状态变量的值。

目前,在控制时刻对稳定性影响方面所进行的一些研究大多是试算性的(如对快关控制时刻的研究等^[5,6]),没能从理论上解释控制时刻影响控制效果的原因,更没有给出寻找最佳控制时刻的方法。本文作者提出了一种利用系统暂态能量函数方程来研究控制时刻对系统稳

定性影响的数学模型,利用该模型可以分析控制时刻影响控制效果的原因是,不同的控制时刻对应于控制结束后系统不同的暂态能量,从而指出最佳控制时刻确定的原则是,控制结束后系统的暂态能量最小。如果将乒乓控制统一称为网络操作,本文通过分析和仿真表明,在系统动态过程中所进行的网络操作,都存在最佳的操作时刻。

1 分析网络操作时刻对稳定性影响的数学模型

忽略阻尼时,多机系统以惯性中心为参考的运动方程为^[1]:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (1)$$

$$M_i \frac{d\omega}{dt} = P_i - \sum_j^n [C_{ij} \sin \theta_{ij} + D_{ij} \cos \theta_{ij}] - \frac{M_i}{M_T} P_{CO1} \quad (2)$$

式中:

$$\theta = \delta_i - \delta_0 \quad (3)$$

$$\omega = \omega_i - \omega_0$$

$$P_i = P_{Ti} - |E_i|^2 G_{ij} \quad (4)$$

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j, C_{ij} = |E_i| |E_j| B_{ij}, D_{ij} = |E_i| |E_j| G_{ij}, \delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i, \omega_0 = \frac{d\delta_0}{dt},$$

$M_T = \sum_{i=1}^n M_i$, G_{ik} , B_{ij} 和 G_{ij} 分别为各发电机自电导、发电机之间的互电纳和互电导。

当系统中发生任何操作时,由于操作前后网络参数等的不连续变化,运动方程是分段表示的。我们主要关心所有操作完成后系统的稳

定性。对于所有操作完成后的系统,其稳定性取决于操作完成时刻系统的暂态能量。一般地,操作完成后的系统稳定域是一定的,所以操作完成时刻系统的暂态能量越小,系统的稳定性越好。

多机系统的能量函数方程有两种表示方法,第一种是以同步坐标轴或某一台发电机为参考的能量函数方程;第二种是以系统的惯性中心为参考的能量函数方程。既然稳定问题研究的是机组间的相对运动,所以用第二种方程研究稳定性较为合理^[2]。

在忽略阻尼和转移电导时,多机系统以惯性中心为参考的能量函数方程为^[1]:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_s) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{js})] \quad (5)$$

式(5)中 θ_s 为各发电机的稳定平衡点,其余各变量的意义与式(1)、(2)相同。式中的右边第一项与转速有关,我们称为动能项,最后两项与转子角度有关,我们称为势能项。

由(5)式可以看出,系统暂态能量的大小,不但与发电机变量和系统参数有关,还与系统的稳定平衡点有关,所以系统暂态能量的变化也随以上各量的变化而变化。在网络操作中,发电机变量是不能突变的,但是发电机之间的互导纳和自电导以及系统的稳定平衡点会发生突变,所以系统的暂态能量会发生突变。我们关心所有操作结束时刻系统的暂态能量,为了计算此能量,必须计算操作过程中系统能量的变化。由于系统运动方程分段表示,所以在各时段内有不同的能量函数方程。如果该时段内系统是自治的,则方程(5)以该时段内系统的稳定平衡点来表示,否则,可用该时段结束后系统的稳定平衡点来计算该时段内能量的变化。

前面已说过,系统的稳定性取决于网络操作完成时刻系统的暂态能量,设操作完成的时刻为 t ,则最佳时刻满足下式:

$$V_t^+ = \min \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_s) - \right.$$

$$\left. \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{js})] \right\} \quad (6)$$

式(6)中的稳定平衡点是操作完成后系统的稳定平衡点,其余各变量的值均为操作完成时刻的值。

为了分析方便,本文将网络操作分为三种类型,第一种为,系统在静态时由一种运行方式变为另一种运行方式,如无故障切除一条线路等情况;第二种为,系统在动态过程中瞬间由一种运行方式变为另一种运行方式,如瞬时性故障的重合闸成功和一次投入制动电阻后的切除等;第三种为,系统在动态过程中经过一段时间的扰动过渡到另一种运行方式,如永久性故障的重合闸和汽门快关后的开启等。

2 第一种网络操作对系统稳定性的影响分析

对于第一种网络操作,操作前系统处于稳定运行中,暂态能量为0,网络操作的结果是系统参数和稳定平衡点发生变化。操作完成时刻系统的暂态能量是由于此时运行点不在稳定平衡点而获得的势能,可表示为:

$$V_t = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\omega_i)^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_{is}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ijs})] \quad (7)$$

式(7)中, ω_i 为操作完成时刻各发电机的角速度,因为角速度不能突变,所以: $\omega_i = 0$, θ_i 为操作完成时刻各发电机的角度,同样角度不能突变,所以 θ_i 是操作前的稳定平衡点 θ_s , θ_{is} 为操作后系统的稳定平衡点,其余各参数为操作完成后系统的参数。(7)式又可以写为:

$$V_t = - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_s - \theta_{is}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{js} - \cos \theta_{ijs})] \quad (8)$$

由式(8)可见,对于第一种网络操作,操作完成时刻系统的暂态能量与操作的时刻无关,只与操作前后系统的稳定平衡点和操作完成后系统的参数有关,所以,第一种网络操作时刻对操

作完成后系统的稳定性无影响。

3 第二种网络操作时刻对系统稳定性的影响分析

第二种网络操作的主要特征是,网络操作前系统处于摇摆过程中,操作在瞬间完成。令操作时刻为 t ,操作前后系统的暂态能量分别用 V_i^- 和 V_i^+ 表示,操作的最佳时刻就是使得 V_i^+ 最小的时刻。设网络操作前的系统暂态能量为 V_c ,则 $V_i^- = V_c$ 。

动能项值的大小只与转速有关,由于转速不能突变,所以网络操作前后动能项的大小一般是不变的(除了切机)。势能项值的大小与转子角度和其稳定平衡点以及网络参数有关,虽然转子角度不能突变,但是网络操作前后系统的稳定平衡点和系统参数要发生变化,所以势能项的值在操作前后要发生变化,则系统的暂态能量在操作前后要发生变化,而且不同的操作时刻这一变化的大小不同,这就是我们对于第二种网络操作寻找最佳时刻的出发点。

下面以单机无穷大系统中一次投入制动电阻后最佳切除时刻的研究来简要阐述本文方法的基本原理。

在忽略阻尼和转移电导时,单机无穷大系统的能量函数方程为^[1]:

$$V = \frac{1}{2}M\omega^2 - P(\delta - \delta_s) - P_e(\cos\delta - \cos\delta_s) \quad (9)$$

式中 M 为发电机的惯性时间常数, $P = P_T - (E)^2G$, δ 为发电机功角, δ_s 为发电机功角的稳定平衡点, $\omega = \frac{d\delta}{dt}$, G 为发电机节点的自电导。

设制动电阻切除前系统的暂态能量为 V_c ,制动电阻在 t_c 时刻切除,则:

$$V_{ic}^- = \frac{1}{2}M\omega_c^2 - P(\delta_c - \delta_s) - P_e(\cos\delta_c - \cos\delta_s) = V_c \quad (10)$$

设制动电阻切除后系统的稳定平衡点 δ_s ,由于自电导 G 发生变化,所以式(9)中的 P 变为 P' ,则:

$$V_{ic}^+ = \frac{1}{2}M\omega_c^2 - P'(\delta_c - \delta_s) - P_e(\cos\delta_c - \cos\delta_s) \quad (11)$$

由(10)式可以得到:

$$\frac{1}{2}M\omega_c^2 = V_c + P(\delta_c - \delta_s) + P_e(\cos\delta_c - \cos\delta_s) \quad (12)$$

将(12)式代入(11)式后可以得到:

$$V_{ic}^+ = V_c + \delta_c(P' - P) + (P'\delta_s - P\delta_s) + P_e(\cos\delta_s - \cos\delta_s) \quad (13)$$

式(13)的右边最后两项与电阻的切除时刻无关,第二项值的大小与电阻切除时的功角有关,所以(13)式值的大小与电阻的切除时刻有关。制动电阻切除前后有 $P < P'$,当 δ_c 最大时切除电阻, V_{ic}^+ 的值最小,切除的最佳时刻是 δ_c 最大的时刻。这一结论与文献^[4]的结论类似。

以上只是本文的思想分析第二种网络操作最佳时刻的一个简单举例,用同样的思想也可分析瞬时性故障的最佳重合时刻等问题。

4 第三种网络操作时刻对系统稳定性的影响分析

与第二种网络操作相比,第三种网络操作的主要特征是,系统要经过一段时间的扰动才完成网络操作,这段扰动期间暂态能量的变化对于系统最后的暂态能量起主要影响,下面以永久性故障的重合闸为例来说明第三种网络操作时刻对系统稳定性影响的分析方法。

对于永久性故障,设重合的时刻为 t_h ,重合不成功故障再次切除的时刻为 t_{cc} , t_{cc}^+ 时系统的暂态能量为 V_{icc} (为减少篇幅,推导过程略):

$$V_{icc} = C + \sum_{i=1}^n M_i \omega_{ih} \Delta\omega + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\Delta\omega)^2 + \sum_{i=1}^n (P_i \theta_{ih} - P_i \theta_{icc}) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (C_{ij} \cos\theta_{ijh} - C_{ij} \cos\theta_{ijcc}) + \sum_{i=1}^n (P_i \theta_{is} - P_i \theta_{is}) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (C_{ij} \cos\theta_{ijs} - C_{ij} \cos\theta_{ijs}) \quad (14)$$

式中, C 为重合前系统的暂态能量, $\Delta\omega = \omega_{icc} - \omega_{th}$, θ_{th} 和 θ_{icc} 为重合时各发电机的角速度和角度, ω_{icc} 和 θ_{icc} 为故障再次切除时各发电机的角速度和角度, 其余各变量的意义与式(5)相同。

式(14)的右边各项中, 第一项为重合前系统的暂态能量, 与第一次故障的冲击有关, 最后两项取决于重合前与重合不成功再次切除故障后系统参数和稳定平衡点, 与重合时刻无关, 其余各项的值与重合时刻有关, 不同的重合时刻对应于故障再切除后不同的暂态能量。以下通过对一个实际系统的仿真, 说明重合于永久性故障减小暂态能量的机理。

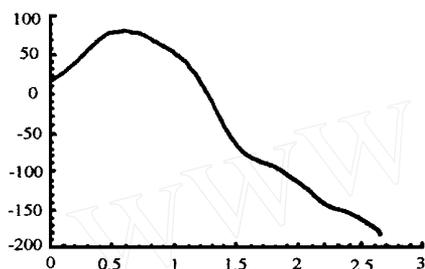


图1 多机系统中临界机功角的失稳曲线

一般地, 故障后系统中的临界机组是受故障影响最大的机组, 故障对它的影响在于使得它加速获得能量。多机系统中发生故障后, 有一些情况下系统并不是在第一摇摆中失去暂态稳定, 而是在回摆中失去暂态稳定, 如图1是某一实际系统在故障后临界机组功角的失稳曲线。

对于这种在回摆中失去稳定的情况, 利用在合适的时刻重合于永久性故障, 可以显著提高系统的稳定性。图1的算例, 故障后不重合时系统将失去稳定, 若在1.0s重合于永久性故障, 系统将会由不稳定变为稳定。

通过大量的研究, 人们越来越认识到系统的稳定不是取决于整个系统的能量, 而是取决于临界机的能量^[3]。对于图1中的临界机, 1.0s时机组正处于回摆期间, 如果没有其它扰动, 当机组在回摆中与系统惯性中心的角度超过180度时与系统失去稳定。如果在此期间重合于

永久性故障上, 临界机的功角由于故障的作用很快增大。对系统惯性中心的角度来讲, 虽然也因为故障而增大, 但与临界机相比, 惯性中心角度增大得较慢, 所以临界机与系统惯性中心之间的角度差将减小, 当临界机的能量以惯性中心为参考时, 故障的作用使得临界机暂态能量中的势能部分减小。

图2是临界机角速度的变化曲线。由图可以看出, 1.0s时临界机的角速度处于减速期间, 此时重合于永久性故障将会使得它加速, 系统惯性中心的角速度变化很小, 故障对它的影响也不大, 所以第二次故障使得临界机的角速度向惯性中心的角速度靠近, 从能量的观点来讲, 故障使得临界机相对与惯性中心的动能减小。

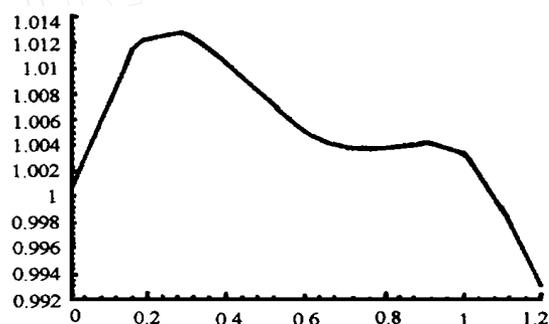


图2 临界机角速度的变化曲线

综上所述, 对于在回摆中失去暂态稳定的系统, 选择合适的时刻重合于永久性故障, 会使得故障再次切除后系统的暂态能量显著减小, 稳定性提高。即使系统在回摆中仍能保持稳定, 只要在较好的时刻重合于永久性故障, 会显著减小系统的暂态能量, 减小系统后续摇摆的幅值。

以上是用本文的思想分析第三种网络操作最佳时刻的一个举例, 用同样的思想可以用来研究汽门快关后的最佳开启时刻等问题。

5 结论

本文提出了一种利用能量函数分析网络操作时刻对系统稳定性影响的思想方法。从有利

于系统稳定的角度提出网络操作最佳时刻满足的条件是,最后一次操作完成后系统的暂态能量最小。利用此方法,本文作者已对多机系统中最佳重合时刻以及快速汽门控制中最佳开启时刻等问题进行了研究,均取得了较满意的结果,验证了本文所提方法的正确性。

参考文献

- 1 夏道止. 电力系统分析(下册). 水利电力出版社, 1995.
- 2 薛禹胜. 暂态能量校正和临界群识别——三论暂态能量函数直接法. 电力系统自动化, 1993, (1).
- 3 陈怡等. 电力系统暂态稳定分析的COI变换. 电力系统自动化, 1995, (4).
- 4 王梅义, 吴竟昌, 蒙定中. 大电网系统技术. 水利电力出版社, 1991.
- 5 Prabhashankar Kundur, James P Bayne. A study of early valve actuation using detailed prime mover and power system simulation. IEEE on P A S, 1975, P A S- 94 :1275.
- 6 Edwards L, Gregory J D. Turbine fast valving to aid system stability: benefits and other considerations. IEEE Trans 1986, P W R S- 1(1) :143.

ENERGY FUNCTION AND ITS APPLICATION IN ANALYZING THE INFLUENCE OF CONTROL TIME ON POWER SYSTEM STABILITY

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

Abstract A method to analysis the influence of control time on power system stability is introduced in this paper, the mathematical model is also established. When system is controlled at the optimal time, the transient energy of the system is minimum.

Keywords transient energy system control optimal time

通过质量管理和质量保证体系认证的企业

继电器及其装置行业 GB/T 19000-ISO 9000 质量管理和质量保证体系的认证工作正在深入开展,截至1997年12月底为止,已有以下13家企业通过了认证并获得证书:

企业名称	通过认证时间	认证机构
1 许继集团有限公司	1995, 12	中国机械工业质量体系认证中心
2 成都通力电器集团股份有限公司	1995, 12	北京华信技术检验有限公司
3 汕头经济特区电器仪表成套厂	1996, 07	北京华信技术检验有限公司
4 汕头经济特区自动化设备总厂	1996, 10	北京华信技术检验有限公司
5 天义电工厂	1997, 10	中国商检质量认证中心, 中国新时代质量体系认证中心
6 温州南洋电器有限公司	1997, 10	德国莱茵公司
7 南京电力自动化设备总厂	1997, 12	英国摩迪公司
8 洪都无线电厂	1997, 12	赛宝质量体系认证中心
9 阿城继电器股份有限公司	1997, 12	北京华信技术检验有限公司
10 阿城继电器二厂	1997, 12	北京华信技术检验有限公司
11 阿城继电器三厂	1997, 12	北京华信技术检验有限公司
12 上海继电器有限公司	1997, 12	北京华欣德机械质量技术检验中心
13 鞍山继电器厂	1997, 12	北京华信技术检验有限公司 国家方圆标志认证委员会