

重合闸时刻对 CCT 的影响*

袁宇春 张保会 西安交通大学电力工程系(710049)

【摘要】 临界切除时间(CCT)表示在系统失去稳定前一个给定的故障最大可允许的持续时间。一般认为,CCT 与故障地点、故障类型以及故障前后系统的结构有关。对于给定的故障,CCT 的大小决定于系统在这种故障下的稳定域,本文通过对重合闸后系统的李亚普诺夫暂态能量函数的分析表明,通过重合闸可以减小系统的暂态能量。如果使得暂态能量减小到比不重合闸时的暂态能量小时,则重合使得系统的稳定性提高了。本文的算例表明,对于在第二摇摆系统失去稳定的故障,通过重合闸可以使系统对故障的承受能力增强,与不重合闸相比,故障的 CCT 明显增大。

【关键词】 重合闸 CCT

引言

在一个给定的故障下,系统的稳定性常用故障的临界切除时间来表示,CCT 越大表明系统承受给定故障的能力越强。暂态稳定研究的一个主要内容就是如何快速而准确地计算 CCT,而对于如何采取一些较简单的措施来增大系统在给定故障下的 CCT,即增大系统对于故障承受能力研究的较少。对于多机系统,发生故障后,系统大多在第二摇摆失去稳定。基于这一事实,本文研究了通过选择一最佳的重合闸时刻使得系统在给定故障下的 CCT 增大,即增强系统对于故障的承受能力。

CCT 的计算方法主要有数值积分法和基于李亚普诺夫能量函数的直接法。数值积分法准确,但由于要经过多次试算,很费时。直接法的优点是速度快,但是结果常常偏于保守。用直接法求解 CCT 的大致步骤是:对于给定的故障,先求出系统的稳定域 V_s ,然后用数值积分法求系统在故障下的暂态能量,当此暂态能量等于 V_s 时的时间就是 CCT。这个求解过程说明:可以用系统的暂态能量来表示系统的稳定性;故障对系统的影响主要反映在由于故障的持续时间使得系统的暂态能量增大,当此暂态能量大于系统的稳定域 V_s 时,系统不稳定。这就给我们以启示,如果能通过某种措施,使得系统中由于故障造成的暂态能量减小,则系统的稳定性就提高了。故障后投入电气制动就是基于这一思想的。

对于给定的故障和故障后的网络结构,如果故障切除后不再进行其它网络操作,故障的 CCT 是一定的,其大小取决于在这种故障下系统的稳定域 V_s 。稳定域 V_s 越大,则系统承受故障的能量越强,即在保持系统稳定的前提下可以容许更大的 CCT。

本文通过对重合闸后系统的暂态能量函数的研究表明,对于一个给定的故障,选择不同的重合闸时刻,网络最后一次操作后系统有不同的暂态能量。通过选择一最佳重合闸时刻可以使得系统在最后一次操作后的暂态能量最小。如果存在这样一个重合闸时刻,即使重合不成功故障再次切除后系统的暂态能量也比不重合闸要小,则这种情况下系统的稳定性也比不重合闸好。由于在给定的故障和故障后网络结构一定的条件下,系统的稳定域是一定的,所以重合闸的效果在于在保持系统稳定的条件下,与不重合闸相比,可允许由故障造成的暂态能量有一定

的增大,也即允许故障的持续时间 CCT 增大。这一研究的实际意义在于,对于一些故障当实际切除时间大于 CCT 时,系统将失去稳定,但是可以通过重合闸使得不稳定的系统变得稳定,这种提高稳定性的措施与电气制动相比,其经济性是不言而喻的。下面将以永久性故障为例对此问题进行研究。

1 分析重合闸对系统暂态稳定影响的数学模型

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为^[1]:

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

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \delta_i - \delta_0 \\ \omega &= \omega - \omega_0 \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$P_i = P_{Ti} - |E_i|^2 G_{ii} \quad (3)$$

θ_s 为各发电机的稳定平衡点

$$C_{ij} = |E_i| |E_j| B_{ij}$$

其中: $\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i$, $\omega_0 = \frac{d\delta_0}{dt}$ 为系统惯性中心的角度和角速度

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i, \quad G_{ii} \text{ 和 } B_{ij} \text{ 分别为各发电机自电导和发电机之间的互导纳}$$

设系统发生故障后切除时间为 t_{cl} , 由故障造成的暂态能量为 V_c , V_c 的大小依赖于 t_{cl} , t_{cl} 越大则 V_c 越大, 如果故障后再没有其它网络操作, 则系统的暂态能量将保持 V_c 。

如果故障第一次切除后在 t_h 时刻重合闸, 当不考虑能量损耗, 在 t_h 时刻系统的暂态能量等于故障切除时刻系统的暂态能量:

$$V_{th} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\hat{\omega}_{th})^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_{th} - \theta_s) - \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{jth} - \cos \theta_{ijs})] = V_c \quad (4)$$

上式中, θ_s 为断路器第一次跳开后各发电机的稳定平衡点, C_{ij} 由此时各发电机之间的互导纳和电势求得, $P_i = P_{Ti} - |E_i|^2 G_{ii}$, 其中 G_{ii} 为此时各发电机的自电导。

对于永久性故障, 重合不成功, 在 t_{cc} 时刻故障再次被切除, 并设 θ'_{is} 为重合不成功再次切除故障后各发电机的稳定平衡点, P'_i 和 C'_{ij} 由故障线路切除后各发电机的电势和自电导以及发电机之间的互导纳求得。 t_{cc} 时刻系统的暂态能量为:

$$V_{tcc}^+ = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\hat{\omega}_{tcc}^+)^2 - \sum_{i=1}^n P'_i (\theta_{tcc}^+ - \theta'_{is}) - \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n [C'_{ij} (\cos \theta_{jtcc}^+ - \cos \theta'_{ijs})] \quad (5)$$

设重合于永久性故障到断路器再次跳开的时间段内各发电机角速度的增量为 $\Delta\omega$ 即:

$$\hat{\omega}_{tcc}^+ - \hat{\omega}_{th}^+ = \Delta\omega \quad (6)$$

由 6 式可以得到:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\hat{\omega}_{tcc}^+)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\hat{\omega}_{th}^+)^2 + \sum_{i=1}^n M_i \hat{\omega}_{th}^+ \Delta\omega + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\Delta\omega)^2 \quad (7)$$

由 4 式并考虑到, $\theta_{th} = \theta_{th} = \theta_{th}$ 可以得到:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i (\hat{\omega}_{th}^+)^2 = V_c + \sum_{i=1}^n P_i (\theta_{th} - \theta_s) + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{jth} - \cos \theta_{ijs})] \quad (8)$$

将式 8 代入式 7 并考虑到 $\hat{\omega}_{tcc}^+ = \hat{\omega}_{tcc}^+ = \hat{\omega}_{tcc}^+$, $\theta_{tcc}^+ = \theta_{tcc}^+ = \theta_{tcc}^+$ 可以得到:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_i^n M_i (\hat{\omega}_{tcc}^+)^2 = & V_c + \sum_i^n P_i (\theta_{th} - \theta_s) + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_i^n [C_{ij} (\cos \theta_{jth} - \cos \theta_{js})] \\ & + \sum_i^n M_i \hat{\omega}_{th} \Delta \omega + \frac{1}{2} \sum_i^n M_i (\Delta \omega)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

将 9 式代入 5 式整理后得到:

$$\begin{aligned} V_{tcc} = & V_c + \sum_i^n M_i \hat{\omega}_{th} \Delta \omega + \sum_i^n \frac{1}{2} M_i (\Delta \omega)^2 \\ & + \sum_i^n (P_i \theta_{th} - P_i' \theta_{tcc}) + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_i^n (C_{ij} \cos \theta_{jth} - C_{ij}' \cos \theta_{jtcc}) \\ & + \sum_i^n (P_i' \theta_{is}' - P_i \theta_s) + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_i^n (C_{ij}' \cos \theta_{ijs}' - C_{ij} \cos \theta_{js}) \end{aligned} \quad (10)$$

由式 10 可见,重合闸不成功再次切除故障后系统的暂态能量等于由第一次故障造成的暂态能量 V_c 与其余 6 项的和,10 式的最后两项与重合闸时刻无关。对于剩余几个与重合闸时刻

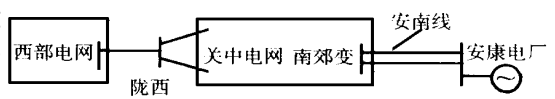


图 1 西北电网主要接线方式

有关的项,如果能选择一重合闸时刻,使得它们的和达到最小,而且这时的 $V_{tcc} < V_c$,则与不重合闸相比,重合闸使得系统所要吸收的暂态能量减小了。如果对于某种故障,其实际的切除时间大于 CCT,即 V_c 大于稳定域 V_s ,当我们通过重合闸使得 $V_{tcc} < V_s$,则原来不稳定的系统就变得稳定了,从某种意义上说,这相当于增大了故障的临界切除时间 CCT。

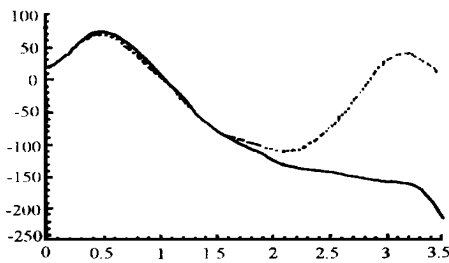


图 2 不重合闸时系统的稳定和 unstable 曲线

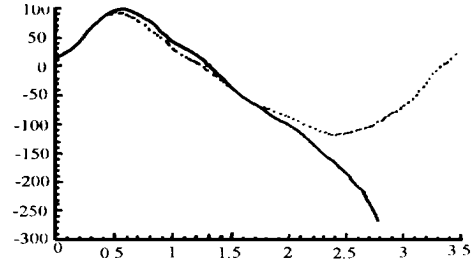


图 3 重合闸时系统的稳定和 unstable 曲线

2 算例

算例采用西北电力系统,其主要接线形式如图 1 所示:

图 1 中,安康电厂有 4 台容量各为 20 万的机组,通过同杆双回线(称为安南线)与关中电网相连,距离较大。系统的主要潮流方式为:安南线送入关中电网电量为 70 万,西部电网送入关中电网的电量为 80 万。当安南线中的一回线路发送三相短路永久性故障时,安康电厂为保持与主网的同步,0.2s 切两台机。这种情况下,如果不采用重合闸,通过数值积分可算出临界机组为关中电网秦岭电厂发电机,故障的临界切除时间为 0.155s。图 2 所示为 0.155s(图中虚线)和 0.156s(图中实线)切除故障下秦岭电厂发电机与系统其余发电机之间功角的摇摆曲线。如果采用重合闸,重合时间为 1.0s,用数值积分可算出临界机组仍然为秦岭电厂的发电机,故障的临界切除时间为 0.205s。图 3 所示为 0.205s(图中虚线)和 0.206s(图中实线)切除故障下秦岭电厂发电机与系统其余发电机之间功角的摇摆曲线。这一结果清楚地表明,采用重合闸使得系统的稳定性有明显的提高。

(下转 17 页)

(4) $\Delta i_1(k) \cdot \Delta i_2(k) > 0$ 且 $\Delta i_1(k-1) \cdot \Delta i_2(k-1) \leq 0$ 。必有 Δi_1 、 Δi_2 之一变号, i_1 、 Δi_2 之一与 i_0 有交点且这一交点处于交点相角区间的终点。

计算交点相角的程序段放在采样定时中断服务程序中, 程序简要流程图如图 5。

采用这种算法, 每相只需同时存储变压器原副方的第 $k-1$ 、 k 、 $k+1$ 、 $k+2$ 次各 4 个电流采样值, 占用计算机内存少。用单片机实现时, 可将这些数据存放在单片机的片内数据存储器中, 以提高存取和计算速度。同时从流程图容易看出, 算法计算量很小。

内部短路时, 交点相角较大, 保护能在交点相角下限出现之前动作, 反映故障时间可小于 10ms 。

为了验证本文算法的可行性, 我们采用一通用微机数据采集、监控模板构成保护装置样机, 并编制了相应的保护软件。励磁涌流采用间断角原理制动, 间断角采用与计算交点相角类似的算法求取。检测变压器三相 6 个电流互感器二次电流, 若发现其中有 1 个为零, 而其余 5 个都不为零时, 认为有互感器断线, 闭锁保护并发出断线信号。对这套动模装置进行实验, 保护性能达到了预期的要求。

4 结论

本文提出的变压器差动保护算法, 将交点相角法原理应用到微机保护领域, 使两者在技术上的优势有机结合起来, 保护具有较高的灵敏度和可靠性。保护算法占用内存少, 计算量小, 反映故障时间短, 易于实现。实验证实了算法的可行性和有效性。

参考文献

- 1 谭文其、黄纯、沈学斌. 相角比较式变压器差动保护. 继电器, 1995. 4
- 2 谭文其等. 构成继电保护的新方法—交点相角法. 湖南大学学报, 1995. 5
- 3 陈德树. 计算机继电保护原理与技术. 北京: 水利电力出版社, 1992
- 4 王维俭. 大型机组继电保护理论基础. 北京: 水利电力出版社, 1988

(上接 6 页)

3 结论

对于永久性故障, 一般的观点认为不应采取重合闸。但是本文通过对系统在重合闸操作后暂态能量函数的分析, 说明了对于一些永久性故障, 只要选择合适的重合闸时间, 可以使得系统在最后一次网络操作后的暂态能量比不采用重合闸还要小, 这样的重合闸操作对系统的稳定性是有好处的。对于一些实际的故障, 当其切除时间大于临界切除时间时, 若不采取其它网络操作, 系统将失去稳定。按照本文的观点, 在这种情况下, 只要能选择一最佳的时刻重合闸, 即使重合不成功, 仍可使原来不稳定的系统变的稳定, 这相当与增大了这种故障的临界切除时间。而且重合闸操作与其它提高系统稳定性措施如电气制动相比, 具有明显的经济性。对于实际系统的仿真也说明, 合适重合闸操作可以显著提高系统的稳定性。

参考文献

- 1 余贻鑫、陈礼义. 电力系统的安全性和稳定性. 科学出版社, 1988

CONTENTS AND ABSTRACTS(Partial)

THEORETICAL STUDY AND APPLICATION

The Influence of Reclosing Instant to CCT Yuan Yuchun, Zhang Baohui(4)
The critical clearing time (CCT) is defined as a given maximum permissible duration of fault before power system loses its stability. In general, CCT regards fault location, fault type and system structure before and after fault. For a given fault the extent of the CCT is decided on the stable region of the system under the fault. It is indicated from analysis on the transient energy function of the system after reclosing, that the reclosing can decrease the transient energy of the system. If the transient energy is decreased to less than that when not reclosing, the reclosing can improve the system's stability. It is indicated from calculation, for the fault at which the system will lose its stability under the second swing, the reclosing is able to heighten the withstanding capacity of the system to the fault. Comparing with that when not reclosing, the CCT of the fault increases importantly.

Keywords: Reclosing CCT

Node Voltage Analysis Method of Fault on Parallel Double Transmission Lines with Multi-Branches Zhang Xiaoyou, Cao Yijiang(7)

Basing on the current measured on each terminal of parallel double transmission lines with multi-branches, calculate the node voltages to detect and diagnose fault on the transmission lines. It is proved from simulation that the method is effective.

Keywords: Multi-branch Parallel double transmission line Fault diagnosis

A Measuring Method of Power System Frequency Basing on the Fourier Filtering Principle Zhou Damin(10)

An algorithm which uses output of the Fourier filter to measure power system frequency is presented. The algorithm adopts a simplified processing mode to eliminate the influence of different amplitude gains of sine and cosine filters and thus decreases calculation and responding time. Simulation result shows that the algorithm doesn't suffer from voltage zero-cross-point and has a higher measuring accuracy.

Keywords: Frequency Frequency measurement Power system

A New Algorithm of Microprocessor-Based Transformer Differential Protection Huang Chun et al(14)

A new algorithm of microprocessor-based transformer differential protection which uses a principle of cross phase angle method is presented. The algorithm can reliably discriminate internal and external faults of transformer and features less internal memory occupied, less calculations and shorter response time to fault.

Keywords: Transformer differential protection Cross phase angle method Microprocessor-based protection

Fast Data Acquisition of Stability Supervisory Control for Power System Ruan Shuhua, Zhou Buxiang(18)

A circuitry design scheme which can fast acquire pre/post fault data to ensure the real-time of stability supervisory control is presented through the analysis on data requirement of stability supervision control of power system and the availability of existing devices.

Key words: Stability supervisory control Data acquisition Realtime

NEW PRODUCT DEVELOPMENT

Development of XWJK-3000 Open Computer-Based Supervision and Control System Cao Quanxi et al(20)

A computer-based supervision & control system with open system structure is introduced. It uses DSP, PC bus and network technique. It can be used to realize integral automation in 35~220kV substations.

The Study of Microprocessor-Based Stability and Control Device Applied in Fengbai System Zhang Tao et al(23)

A new type of microprocessor-based device based on the spot is introduced. The device deals with the voltage of busbar and the current of transmission lines which are connected to the device. The device detects type of fault by means of the voltage and current and trips generators according to the settings. The hardware and software of the device are mainly described. Today, the device is applied in Dongfeng substation, Meihe substation, Hadawan substation and Fengman hydropower plant of Fengbai power system.

Analysis on the Technical Features of YTF(S)-500 Remote Trip Signal Transmission Device Zhu Yanzhang, Wang Kuipu(27)