

优化重合闸时间提高网络传输能力^{*}

张保会 雷敏 袁宇春 西安交通大学电力工程系 (710049)

【摘要】 论述了电力系统自动重合闸重合时刻对电力系统稳定性的影响,建立了分析重合闸时刻对电力系统稳定性影响的数学模型,使用能量函数导出了瞬时性与永久性故障的最佳重合条件,为重合闸的时间整定和最佳重合闸的研究奠定了理论基础。

【关键词】 稳定性 重合闸 最佳时间

0 前言

目前在电力系统中广泛采用各种自动重合闸以提高供电的连续性和电力系统的稳定性。其起动方式多数为控制开关不对位和保护跳闸起动重合闸,经过固定延时使断路器合闸。这种重合闸存在两方面的问题,其一是不区分故障是瞬时性还是永久性的,起动后经预定时间后断路器合闸,对于瞬时性故障重合成功,系统经过短暂的摇摆进入稳定运行状态。对于永久性故障,重合于故障上,保护动作再次跳开断路器,系统再次遭受故障冲击,可能经较大幅度的摇摆进入新的稳定运行状态,也可能摇摆后失去稳定。为了避免后者的出现,在水利电力部颁布的《电力系统安全稳定导则》中作了各种规定,限制正常运行方式下的潮流,实质上是为了保证暂态稳定限制了网络传输能力,以致使某些发电厂“窝电”或“弃水”。其二是重合闸时间一经整定后是固定不变的,它不能随故障条件的改变而改变。目前重合闸时间的整定主要考虑以下原则确定:两侧保护不同时跳闸时间,保护跳闸后故障点电弧熄灭时间,故障点绝缘恢复时间,断路器再次灭弧及跳闸时间和一定的时间裕度。本文称之为最小间歇时间。它以保证对瞬时性故障能重合成功,对永久性故障能再次跳开为原则,在此基础上考虑系统稳定性的要求。由于对最佳重合时间缺乏足够的研究以及最佳重合时间随故障

条件的改变而改变,目前实际的重合时间主要由最小间歇时间决定,大多在0.5~0.12s之间。

对于第一个问题,瞬时性与永久性故障的识别经多年的研究,西安交通大学葛耀中教授已提出了多种方法,另外英国 Bath 大学也提出了一些方法,这对于避免重合于永久性故障开辟了可行的道路,但对于绝缘子间歇性击穿造成的瞬时性故障和采用三相重合闸无并联电抗器的输电线路上的故障尚无简单实用的识别方法。

对于第二个问题,重合闸合闸时间问题,文献^{[1],[2]}从对电力系统稳定最有利的角度用微分方程的解与初值的关系进行了论述,文献^{[3],[4]}通过仿真计算证实了不同时刻重合于永久性故障上对系统稳定性的影响不同。但是都没有建立重合闸操作时刻对稳定性影响分析的强有力的数学模型,缺乏系统的分析和寻找最佳重合时间的严格方法。

本文通过对单机无限大母线系统建立能量函数模型,分析网络切换时刻不同所产生的暂态能量不同,从而引起系统的摇摆幅度不同,证明无论是重合于瞬时性故障还是永久性故障,无论是单相还是三相重合闸都存在最佳重合时刻,并且这个最佳重合时刻随故障前电力系统运行条件和故障的严重程度、持续时间的变化而变化,但是最佳重合条件所对应的角速度和功角具有明显的特征,根据这些特征无论是重合闸时间的离线整定计算,还是研制最佳重合闸装置捕捉之,都是有可能实现

1997—10—13 收稿

^{*}本文为国家自然科学基金(59677012)项目资助

的。

1 分析网络操作时刻对电力系统稳定性影响的数学模型

李雅普诺夫直接法在电力系统中的应用经过多年的研究目前已经取得了相当的进展，在暂态稳定的快速估计方面成绩斐然，暂态能量法、势能边界法法和扩展的等面积定则法各自显示了不再使用数值积分而快速判定系统稳定性的巨大威力。本文采用能量型李雅普诺夫函数，为了便于说明概念，以单机无限大母线系统为例。

忽略阻尼，发电机采用经典模型，转子运动方程为：

$$\begin{cases} M \ddot{\delta} = P_T - \frac{E U}{X_{Mi}} \sin \delta \\ \dot{\delta} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

系统

其中 X_{Mi} 为不同网络结构下系统的联系阻抗。取能量函数为：

$$V(X) = \frac{1}{2} M \dot{\delta}^2 - \int_s (P_T - P_{ei} \sin \delta) d\delta \quad (2)$$

其中 $P_{ei} = \frac{E U}{X_{Mi}}$ 。

网络操作完成后系统的稳定性可用临界能量 V_{cr} 与网络操作完成时刻暂态能量 V_{th} 的值决定。

$$V_{cr} = - \int_s^u (P_T - P_{ea} \sin \delta) d\delta \quad (3)$$

其中 P_{ea} 为网络操作完成后对应的功率传输极限， $P_{ea} = \frac{E U}{X_{Ma}}$ ， u 为相应的不稳定平衡点对应的角度。

$$V_{th} = \frac{1}{2} M \dot{\delta}_{th}^2 - \int_s^{th} (P_T - P_{ea} \sin \delta) d\delta = C \quad (4)$$

网络操作完成后的系统是一个自治系统，其能量保持不变：

$$V_t = \frac{1}{2} M \dot{\delta}_t^2 - \int_s^t (P_T - P_{ea} \sin \delta) d\delta = V_{th} = C \quad (5)$$

在分析暂态稳定的时间内，认为动能 $\frac{1}{2} M \dot{\delta}_t^2$ 与势能 $-\int_s^t (P_T - P_{ea} \sin \delta) d\delta$ 在相互转换，如果

$$V_t < V_{cr} \quad (6)$$

则系统是稳定的。当系统是稳定的，并且用功角摇摆最大值来表示稳定程度时，不难得出暂态能量 V_t 越小，其功角的摆动幅度越小，系统的摇摆越轻微。

对于网络最后一次操作后的系统，定义一个表示稳定程度的指标 V_t ，并且寻找网络操作完成时刻对应的 V_{th} 。对网络操作时刻进行控制，在 V_{th} 最小时完成操作，所对应的时刻就是最佳操作时刻。

$$t_h = t_{opt} / \{ V_t = \min(V_{th}) \} \quad (7)$$

式 (6) 对于分析诸如故障一切除这样简单扰动也许并无太大意义（因为总是希望故障切除的时间越短越好），但是对于诸如重合闸在 (t) ， (t) 连续变化条件下进行操作时刻控制具有重要意义，最佳重合时刻的选择就是选择满足式 (6) 的 t_h 。

2 最佳重合闸时刻的条件

为了便于推导分析，假定单机无限大系统经多回联络线接入系统，使用三相重合闸。

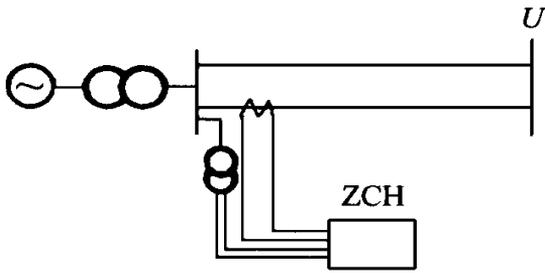
2.1 瞬时性故障的最佳重合条件

系统如图 1 (a) 所示，功角特性如图 1 (b)。正常运行于功角 δ_0 处，极限功率为 P_0 ，重合成功后稳定运行点 $\delta_s = \delta_0$ ，功率极限为 $P_3 = P_0$ ，故障切除后重合前运行于极限功率为 P_2 的曲线 P_{e2} ，稳定平衡点为 δ_s 。故障期间的功角曲线为 P_{e1} 。

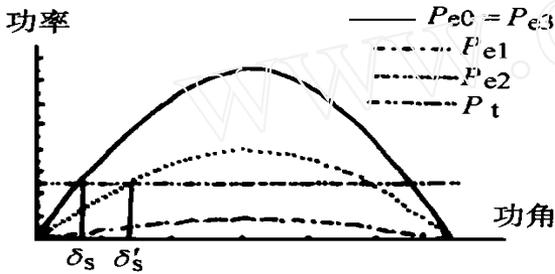
令重合时刻对应的的时间、角度、角速度分别为 t_h ， δ_{th} ， $\dot{\delta}_{th}$ ，则最佳重合条件为：

$$V_{th} = \min \left\{ \frac{1}{2} M \dot{\delta}_{th}^2 - \int_s^{th} (P_T - P_3 \sin \delta) d\delta \right\} \quad (8)$$

由于 (t) ， (δ) 的连续性， $\dot{\delta}_h^+ = \dot{\delta}_h^-$ ， $\delta_h^+ = \delta_h^-$



(a) 系统图



(b) 功角曲线

图1

\tilde{t}_h ，重合前网络的暂态能量为

$$V_{\tilde{t}_h} = \frac{1}{2} M_{\tilde{t}_h}^2 - \int_s^{\tilde{t}_h} (P_T - P_2 \sin \delta) d\delta = C_1$$

并且保持故障切除时的值不变，得到：

$$V_{t_h} = \min \left\{ C_1 + \int_s^{t_h} (P_T - P_2 \sin \delta) d\delta - \int_s^{t_h} (P_T - P_3 \sin \delta) d\delta \right\} \quad (9)$$

因为 $s < s_s$ ，式(9)的最后一项可写成：

$$\int_s^{t_h} (P_T - P_3 \sin \delta) d\delta = \int_s^{s_s} (P_T - P_3 \sin \delta) d\delta + \int_{s_s}^{t_h} (P_T - P_3 \sin \delta) d\delta \quad (10)$$

式(10)代入(9)并整理得到：

$$V_{t_h} = \min \left\{ C_1 - \int_s^{s_s} (P_T - P_3 \sin \delta) d\delta + \int_s^{t_h} (P_3 \sin \delta) d\delta \right\} \quad (11)$$

分析式(11)，其中 C_1 是由首次故障条件及切除后网络决定的，不可控。第二项是由重合前网络与重合成功后网络的平衡点及稳定运行条件决定，与重合时刻无关，只有第三项与重

合时刻对应的功角有关。不难求得 V_{t_h} 取极小值的条件为：

$$t_h = 0^\circ \text{ 或者 } t_h = (t)_{\min} (t_h > 0) \quad (12)$$

t_h 的极小值是否过 0° ，取决于故障前运行条件和第一次故障冲击的大小。认真选择重合时刻，使重合闸操作产生的能量为负值，抵销第一次故障冲击产生的暂态能量。

2.2 永久性故障的最佳重合条件

重合于永久性故障时，网络的最后一次操作是重合后保护再次跳开断路器。类似于瞬时性故障，若最佳跳开时刻为 t_{cc} ，则永久性故障最后一次网络操作条件为：

$$V_{t_{cc}} = \min \left\{ \frac{1}{2} M_{t_{cc}}^2 - \int_s^{t_{cc}} (P_T - P_2 \sin \delta) d\delta \right\} \quad (13)$$

然而不能为寻找最佳再切除时间而延长故障的切除时间，再次故障的切除的时间由保护及断路器跳开时间决定，一般为 0.1s 左右。更有意义的是寻找满足式(13)条件的重合时间，令

$$t_{cc} = t_h + \frac{1}{2} M_{t_{cc}}^2 = \frac{1}{2} M_{t_h}^2 + M_{t_h} + \frac{1}{2} M^2 \quad (14)$$

因为

$$\frac{1}{2} M_{t_h}^2 = C_1 + \int_s^{t_h} (P_T - P_2 \sin \delta) d\delta$$

将式(14)代入式(13)并整理得

$$V_{t_{cc}} = \min \left\{ C_1 + M_{t_h} + \frac{1}{2} M^2 - \int_s^{t_{cc}} (P_T - P_2 \sin \delta) d\delta \right\} \quad (15)$$

$$\text{或 } V_{t_{cc}} = \min \left\{ C_1 + \int_s^{t_{cc}} (P_2 - P_1) \sin \delta d\delta \right\} \quad (16)$$

式(15)的解析解难于简单确定，但是采用数值解不难获得。在近似估计时可以取：

$$t_h = \text{负极大值} \quad (17)$$

分析式 (15), 不难发现第二项中若 t_h 取负值取正值时, 这部分动能抵销了第一次故障冲击产生的能量, 第四项类似于势能, 它随 t_h 而变化。当功角处于回摆并在角速度达到负极值附近, 以上两项均为负值, 此时重合于永久性故障上不仅不会增加系统的暂态能量, 反而可以使暂态能量小于第一次故障冲击产生的 C_1 , 有效地阻尼系统的摇摆。反之如果重合时刻掌握不好, 当 t_h 处于加速过程中重合时, 以上两项均为正值, 将加剧系统的冲击, 当超过临界能量 V_{cr} 时系统失稳。

2.3 最佳重合时间的应用意义

由于前已叙及的最小间歇时间的限制, 不可能无限制地快速重合, 常用的重合闸时间为 0.5 ~ 1.2s 之间。对于永久性故障, 当在机组加速的过程中重合于故障上时, 第二次故障冲击产生的暂态能量迭加于第一次故障冲击产生的暂态能量上, 而故障再清除后系统的临界能量 V_{cr} 不变 (与重合前相比), 从而使不重合是稳定的系统变得有可能不稳定, 而最佳时间重合不仅不会加剧系统的摇摆, 反而使第二次故障冲击抵消了第一次故障冲击的不利影响, 比不重合还好。从这个意义上来讲, 最佳时刻重合于永久性故障是阻尼系统摇摆的有效手段。对于瞬时性故障不重合就会失稳的系统, 快速重合增加网络吸收暂态能量的能力即增加 V_{cr} , 当然可以增加系统的稳定性。然而实际系统的运行方式受《电力系统稳定导则》的限制, 这种方式是很少出现的, 更多的情况是不重合也是稳定的, 有意义的是减少系统的摇摆幅度并尽快平息。瞬时性故障的最佳重合时刻就是寻找对阻尼系统摇摆最有利的时刻, 使摇摆尽快平息。

简言之, 重合闸时间并不是越短越好, 存在最佳重合时间。在这个时间重合无论重合于永久性故障还是瞬时性故障, 都会阻尼系统的摇摆而不是加剧它。最佳重合时间随运行条件和故障条件的变化而变化, 应该按照式 (12) 或式 (15) 求得。

3 最佳重合条件的捕捉

根据实现条件可分为两种类型, 其一是利用现有的固定时间间隔的重合闸, 按照最佳重合条件整定重合闸时间, 其二是在继电保护装置的基础上发展最佳重合闸装置, 而后者是真正实现最佳重合的智能化手段, 也是继电保护与控制相结合的新探索。

3.1 最佳重合时间的整定计算

最佳重合时间随瞬时性与永久性故障不同而不同, 随故障前运行状态和故障冲击条件而变化, 但在使用固定延时的继电器整定中只能取某一个值。这时可在限制暂态稳定极限的运行方式下, 按照发生永久性故障的条件, 使重合闸时间满足最佳条件以提高系统的暂态稳定能力或者增加网络的传输能力。最佳重合时间可按下述步骤进行, 详细内容参见文献^[1]。

(1) 在选定的潮流和故障条件下, 进行故障后不重合摇摆曲线计算。

(2) 在曲线上查得 (t) 为负极值的时刻 t_i (会有多个), 取大于最小间歇时间的最小 t_i 作为重合闸优化重合时间。如果不追求绝对最佳, 即可按此值整定重合闸, 否则可以此值为最佳重合时间的初值, 以 t 为步长, 反复修正初值获得最佳重合时间。

3.2 最佳重合闸装置

对发电厂送出线上的最佳重合闸实现方法详细内容参见文献^[2], 它可以随运行方式、故障条件的变化自动捕捉最佳重合时机, 发出重合闸命令。其算法在现有的微机保护中实现不存在困难, 并且在保护功能与重合闸功能间取得了较好的协调。

4 采用最佳重合时刻提高稳定裕度和网络传输能力的算例

算例采用西北电力系统, 共有 230 条母线, 286 条支路, 计算某 80 万千瓦水电厂双回 330kV 送出线上的重合闸时间。离线计算表明, 实际最佳重合时刻与 (12) 式或 (17) 式基本相符。满足理论最佳重合条件的时刻

t_1 与实际最佳重合时刻 t_2 间的误差不超过 0.1s。为了简单起见，以下计算中均以 (12)、(17) 式作为最佳重合条件。

4.1 采用最佳重合时间提高暂态稳定裕度

图 2 (a)，图 2 (b) 示出在输送功率为 79.5 万千瓦条件下，一回线上发生相间瞬时性故障三相重合闸不重合和最佳重合（重合闸间歇时间为 1.7s）、三相重合闸不重合和非最佳重合（重合闸间歇时间为 0.75s）的相平面轨迹。相平面中横坐标为角速度，纵坐标为功角。最后一次操作以后最大功角摆幅（峰一峰差）分别为三相不重合 120.6°，最佳重合 62°，非最佳重合 113.8°。

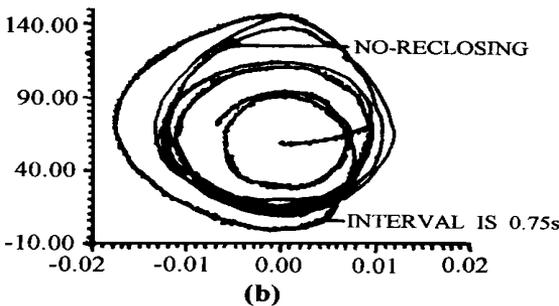
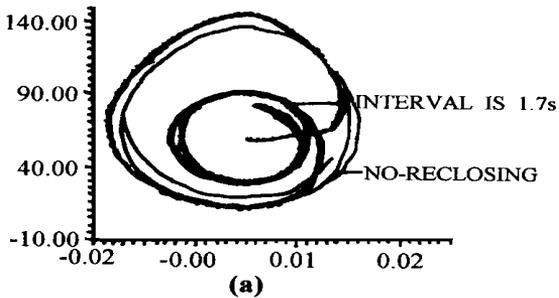


图 2 瞬时性故障不同重合时刻下相平面轨迹

图 3 示出了在输送功率为 79.5 万千瓦条件下，一回线上发生三相永久性故障，三相重合闸不重合、最佳重合（重合闸间歇时间为 1.3s）和按照重合闸间歇实际整定值为 0.6s 重合时的相平面轨迹。明显看出，非最佳重合时系统快速失去稳定，而最佳重合不仅未使系统暂态不稳定，反而比不重合的摆幅还小，第二次故障冲击抵消了第一次故障的冲击，阻尼了系统的摇摆。最后一次操作以后最大功角摆幅（峰一峰差）分别为三相不重合 120.6°，最佳重合 64.7°。

4.2 采用最佳重合时间提高网络传输能力

以功角摇摆峰 - 峰值相同为指标，图 4 给出瞬时性故障条件下最佳重合和非最佳重合时，事故前不同的传输功率，可见最佳重合比非最佳重合提高传输功率 19.5 万千瓦 (32.5%)。

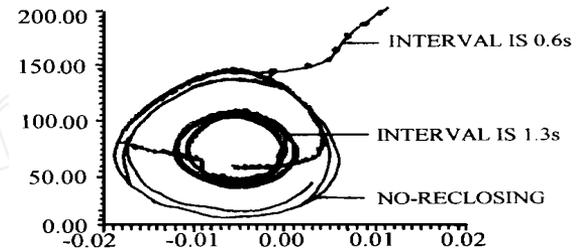


图 3 永久性故障下不同重合时刻相平面轨迹

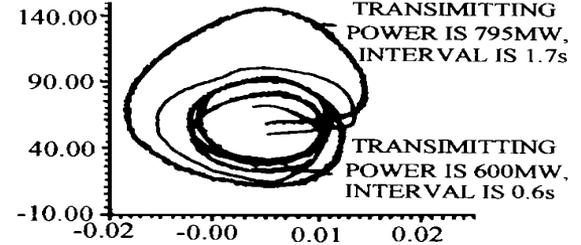


图 4 瞬时性故障最佳重合提高传输功率相平面轨迹

图 5 给出在永久性故障条件下，最佳重合和非最佳重合的事故前传输功率比较。最佳重合比非最佳重合提高传输功率 19.5 万千瓦 (32.5%)，明显提高暂态稳定极限。

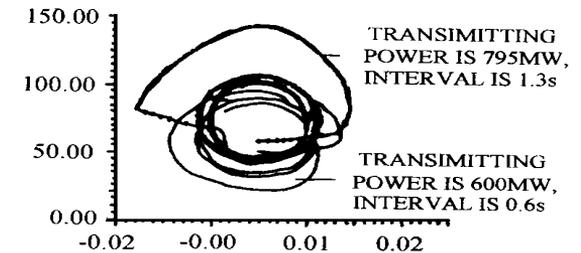


图 5 永久性故障最佳重合提高传输功率相平面轨迹

5 结论

- (1) 本文建立了单机无限大母线系统网络操作时刻对电力系统稳定影响的数学模型。
- (2) 从理论上找到了瞬时性与永久性故障的最佳重合条件。
- (3) 提出了最佳重合闸（下转 32 页）

capitive potential Devices. Electric Energy conference , 1989

4 陈德树. 计算机继电保护原理与技术. 水利电力出版社, 1992

DIGITAL SIMULATION RESEARCH ON TRANSIENT RESPONSE OF CVT

Yu Weiyong, Wu Xiaojian (Shanghai Traffic University, 200240, China)

Abstract The transient characteristics of CVT is digitally simulated in this paper. Different factors related to the transient characteristic of CVT are analyzed and the influence of CVT transient response process on the microprocessor - based protection basing on the full - wave Fourier algorithm is researched. Meanwhile, the influence of the series - compensation capacitors put on UHV transmission line to the transient response of CVT is analyzed and researched.

Keywords CVT transient response full - wave fourier algorithm series - compensation capacitor

(上接 26 页)

A UNIFIED METHOD FOR CALCULATING FAULTS IN POWER SYSTEM WITH SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS

Cao Guochen (Harbin Institute of Technology, 15001, China)

Zou Chunjie (Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 132012, China)

Abstract In this paper, any type of faults (simple or complex) in power system with Superconducting Fault Current Limiters (SFCL) are modeled as symmetrical or asymmetrical modifications to each original sequence networks. Based on the compensation method, by using the phase - sequence parameter transformation technique and the multi - dimensional Thevenin theorem, a unified method is presented for fast calculation of any fault in power system with SFCL. This method can be adaptable to the network changes in topology caused by faults and SFCL. The method has been proved to be fast and accurate by a numerical example.

Keywords Surperconducting fault current limiters power system fault calculation compensation method phase - sequence parameter transformation technique

(上接 21 页)

时刻的捕捉方法。

(4) 仿真计算表明按最佳重合时机重合可以在相同的潮流方式下极大地提高暂态稳定裕度, 在最后一次操作后相同的功角摇摆程度下大幅度提高网络传输能力和暂稳极限。

参考文献

1 张保会、袁越、薄志谦. 最佳重合时间及其整定

计算. 中国电力, No. 2, 1995

2 张保会、康小宁、薄志谦. 发电厂送出线重合闸时机的优选与捕捉. 中国电机工程学报, No. 3, 1995

3 王梅义等. 超高压电网继电保护运行技术. 水电出版社, 1984

4 谢宝炎等. 全国电网稳定会议选集. 电网技术, No. 3 ~ No. 4, 1983

5 葛耀中. 单相重合闸过程中瞬时性与永久性故障的差别. 西安交通大学学报, No. 2, 1984

OPTIMIZING THE RECLOSING TIME TO IMPROVE THE TRANSMISSION CAPACITY OF POWER NETWORK

Zhang Baohui, Lei Min, Yuan Yuchun (Xian Traffic University, 710049, Xian, China)

Abstract The influence of reclosing time on power system stability is discussed in this paper, the mathematical model is also established for analysis of the influence. Transient energy function is applied to determine the optimal reclosing time. The method in this paper set up a theoretical foundation for analysis of the optimal reclosing time.

Keywords stability reclose optimal time