

自适应自动重合闸现状与发展

郭相国,张保会

(西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 对自适应自动重合闸的研究已经取得了很大的进展,瞬时与永久性故障多种区分方法的提出,以及在自适应分相重合闸策略方面取得的进展,使得区分单相和多相的瞬时与永久性故障成为可能;优选最佳重合时刻的理论分析和离线计算也已经较为完善。在评述电力系统自适应自动重合闸研究现状的基础上,建议尽快将已有成果投入实际运用,并对自适应重合闸的发展做了展望。

关键词: 自适应自动重合闸; 瞬时与永久性故障判别; 最佳重合时间; 分相重合方式

中图分类号: TM762.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)16-0077-08

0 引言

电力系统中发生的故障大多是瞬时性故障,为了缩短停电时间,减少经济损失,电力系统广泛采用了自动重合闸。根据现有系统运行情况统计,自动重合闸的成功率一般在60%~90%左右。采用自动重合闸在提高瞬时性故障时供电的连续性、系统运行的稳定性,以及纠正由于断路器或继电保护误动作引起的误跳闸方面起到了很大作用。

但是,自动重合闸不能判别永久故障的盲目重合性也给电力系统带来了不利影响,主要表现为:重合于永久故障,将会对电力系统造成再次冲击,有可能使电力系统失去稳定性;使断路器工作条件变得恶劣。汽轮发电机送出端重合,有可能对发电机轴系造成严重损伤。

长期以来,为了避免自动重合闸重合于永久故障或者严重永久故障,国内外学者做了大量的研究工作,提出了基于瞬时与永久故障判定的自适应自动重合闸。本文通过对国内近些年在自适应自动重合闸方面的研究论文进行分析,评价了自适应自动重合闸的现状和发展。

1 瞬时与永久故障的判定

自适应自动重合闸的基础就是瞬时与永久故障的判定,避免系统重合于永久故障或者严重永久故障。

1.1 单相重合闸过程中瞬时与永久故障判定方法

自从提出自适应重合以后,国内外众多学者从

多种角度研究了电力系统中瞬时与永久故障的判定方法,主要有以下几种:

1) 利用耦合电压的判据

单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久故障的方法,主要是考察一相跳闸后,另外两个正常相引起的跳开相电容耦合电压和电感耦合电压。对于瞬时性故障,由于跳开相故障点已经消除,电容耦合电压与电感耦合电压都存在;而对于永久故障,由于故障点仍然存在,电容耦合电压接近于零,只有电感耦合电压存在。由此,允许重合的电压判据和补偿电压判据如下:

$$U_{DZ} = K_k \cdot U_{x1} \quad (1)$$

$$|U - U_{xL}/2| \leq |K_k \cdot U_{xL}/2| \quad (2)$$

$$|U - 3 \cdot U_{xL}/4| \leq |K_k \cdot U_{xL}/4| \quad (3)$$

$$|U - U_{xL}/4| \leq |K_k \cdot U_{xL}/4| \quad (4)$$

式中: U_{DZ} 为动作电压, $K_k = 1.1 \sim 1.2$,为裕度系数, U_{xL} 最大负载条件下两相运行时的电感耦合电压, U 为断开相的测量电压。

式(1)是电压判据,判定时假定功率因数角 $\varphi = 0^\circ$,不影响判断结果。适用于220 kV和不带并联电抗器和中性点小电抗器的330~550 kV中较短的线路。式(2)是补偿电压判据,其测量有效距离是电压判据的2倍,适用于长距离重负荷高压线路。式(3)和(4)是综合补偿电压判据,其测量有效距离约是电压判据的24倍,适用于带并联电抗器和中性点电抗器的高压长距离输电线路。

此判据简单易行,现已投入实际应用。文献[4]对以上判据进行了修正,并给出了一个完整的单相瞬时与永久故障的判定流程。在实际运用中,文献[5]和[6]都对判据做了适应性改进。文献[5]利用

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50277027);许继奖教金资助项目

实测量实时整定电感耦合电压,文献[6]进一步利用了故障测距值,使判据更为可靠。

2) 利用二次电弧电压谐波特性

在发生单相永久性故障时,故障相二次电弧电压中的谐波衰减速度明显快于瞬时性故障;而瞬时性故障的各次谐波分量由于电弧电压的影响,其中的奇次谐波分量的衰减较慢,致使在故障断开相的端电压中含有较高比例的奇次谐波分量。

文献[7]基于以上分析,依据二次电弧阶段奇次谐波的衰减速度及其能量百分比在不同故障性质下随时间的变化规律存在差异的特性,提出了判别瞬时与永久故障的判据,令:

$$P_e = \frac{\sum_{k=1}^2 u_{2k+1}^2}{\sum_{k=2}^2 u_k^2} \quad (5)$$

式中: P_e 为奇次谐波占总谐波能量的百分比, u_k 为 k 次谐波有效值。

如果 P_e 在熄弧之前,随着时间推移而不断增加则判定为瞬时故障,否则判为永久故障。文献认为可以根据电压幅值突变判定熄弧时间。

系统在发生单相瞬时故障后重合前,电压经历一次电弧阶段、二次电弧阶段、熄弧后电压恢复阶段(因为电容电感耦合的存在),此判据可以在利用耦合电压判据之前判定故障类型,速度较快。但是,本判据较为模糊, P_e 难以整定;永久故障时难以寻找所要“熄弧”时间,从而难以确定判据使用的时间;而且必须在较短时间内连续采样,计算各次谐波幅值,计算复杂。

文献[6]利用谐波含量判定无并联电抗器的线路接地故障的熄弧时间,由于永久故障的快速灭弧,谐波含量低,判据对瞬时和永久故障都较为实用。当满足式(6)时,认为电弧已经熄灭:

$$U_{fd3} + U_{fd5} < 0.2 \cdot U_{fd1} \quad (6)$$

其中, U_{fd1} 、 U_{fd3} 、 U_{fd5} 为断开相两侧实测电压基波、三次谐波、五次谐波幅值。

1.2 在三相重合过程中瞬时与永久故障判定方法

对于带并联电抗器补偿的超高压输电线路,当发生两相故障和三相故障三相跳闸后,线路上各储能元件所储存的电磁能量将会逐渐衰减,由于线路分布电容和并联电抗器的存在,形成自由振荡电压。但是,因为故障类型的不同和瞬时与永久故障的差别,熄弧后线路上自由振荡电压振荡形式表现不同,文献[8]利用计算机模拟,分析了线路三相跳闸后的暂态过程,提出了根据自振电压特点判别三相瞬时与永久故障的方法。

1) 接地短路:当永久故障时,故障相自振电压为零;当瞬时故障时,故障相有一定幅值的自振电压。

2) 不接地故障:当永久故障时,各故障相自振电压相等;当瞬时故障时,各故障相自振电压不相等。

1.3 神经网络及其他新技术方法

文献[9]将模糊控制理论引入单相自动重合闸过程瞬时与永久故障的判定,修正了现有耦合电压判据。文献[10]运用了小波变换捕捉瞬时与永久故障的故障特征。

神经网络(ANN)具有高度神经计算能力以及极强的自适应性、鲁棒性和容错性,它可以充分利用很多简单判据所不能利用的复杂故障特征,并可以改进和综合简单判据,使故障判定更为准确可靠。文献[11~13]对神经网络在自适应自动重合闸中的应用做了初步的探讨,通过建立简单 ANN 模型,大量离线样本予以训练,论证了 ANN 运用的可行性和优越性。

对瞬时与永久性故障判别的多种方法的研究,为自适应重合闸的完善以及在电力系统中的实际运用打下了理论基础。除了耦合电压判据已投入实用外,对于其他判定方法,进一步将它们推入实用阶段,仍需大量的研究工作。

2 最佳重合时间的研究

电力系统传统的自动重合闸时间整定思想都是越快越好,为确保重合动作的成功,整定重合时间充分考虑了以下因素:两侧不同时跳闸;故障点绝缘恢复;断路器绝缘介质强度恢复;断路器操作机构再次合闸恢复;一定的裕度。

它以保证对瞬时性故障能够重合成功,对永久性故障能再次跳开为原则,综合以上因素,取一个最小时间为重合间歇时间,并在此基础上考虑稳定性的要求。

然而文献[14]指出这种传统的“重合越快越好”的思想是一种误解。文献[15,16]根据微分方程解与初值的关系,从理论上分析了重合时间对系统稳定性的影响,并通过仿真验证:对瞬时性和永久性故障都存在一个最佳重合时间;在这个时间重合,在瞬时故障可以使系统经历较小的摇摆很快进入稳定状态,在永久故障时,可以有效阻尼系统摇摆,从而提高系统的暂态稳定极限,增加网络传输能力。

2.1 暂态能量函数法对最佳重合的分析

暂态能量函数 (TEF) 法是分析电力系统稳定的一种比较成熟的方法。暂态能量值可以描述一个自治系统在最后一次网络操作完成后系统振荡的激烈程度,其值越大,表明系统的振荡越严重,当暂态能量值超过系统所能吸收的临界能量时,系统表现为不稳定。

文献[17]建立了单机无限大母线系统能量函数模型,给出了系统稳定的能量函数条件;并指出最佳网络操作时刻即是使能量函数值最小的时刻,通过分析重合闸最后一次操作后系统能量函数中受重合时刻影响的部分,初步给出了瞬时和永久故障时最佳重合的条件。

文献[18,19]建立了多机系统暂态能量函数。发电机采用经典模型,负荷用恒定阻抗表示,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

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\theta}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_{is}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ijs}) \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = -\omega_i - \omega_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$P_i = P_{Ti} - |E_i|^2 G_{ii} \quad (9)$$

式中, $C_{ij} = |E_i| \cdot |E_j| B_{ij}$; $\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i$;

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad \omega_0 = d\theta/dt$$

式中: θ_{is} 为各发电机的稳定平衡点; ω_0 分别为系统惯性中心的角度和角速度; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为各发电机自电导和发电机之间的互电纳。

如果用功角摇摆最大值来表示系统的稳定程度,不难得出:若网络最后一次操作后由式(7)所表示的能量 V 越小,各发电机功角的摇摆幅度就越小,则系统的稳定性就越好。文献分析了重合闸最后一次操作后系统能量函数中受重合时刻影响的部分,根据瞬时和永久故障的不同给出了最佳重合的系统能量函数表达式。瞬时性故障时,网络最后一次操作就是重合闸成功,其最佳重合时间满足的条件可表示为

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n t_{ib} (P_i - P_{ij}) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (C_{ij} - C_{ij}) \cos \theta_{ijb} \right\} \quad (10)$$

式中: t_b 为重合闸时刻; P_i 、 C_{ij} 为跳闸后的值; P_{ij} 、 C_{ij} 为重合成功后的值。

永久性故障时,网络最后一次操作是重合失败,断路器再次跳开,其最佳重合时间满足的条件表示为

$$\min \left[\sum_{i=1}^n M_i \dot{\theta}_{i th}^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\dot{\theta}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (P_i \dot{\theta}_{i th} - P_{i tcc}) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (C_{ij} \cos \theta_{ij th} - C_{ij} \cos \theta_{ij tcc}) \right] \quad (11)$$

式中: t_{cc} 是重合失败,再次跳闸的时间; t_b 是重合闸时间; P_i 、 C_{ij} 是重合失败再次跳闸后的值; $\dot{\theta}_i$ 是角速度在重合时刻与再次跳闸时刻之间的增量。

我们可以看出,(10)(11)两式解析解都很难得出,文献中都是采用稳定计算的数值积分程序计算系统的暂态能量的。

2.2 最佳重合时刻的实时捕捉

文献[15]针对简单的两机系统,根据理论分析得出结论:重合闸最后一次操作的最佳时刻是距离新的稳定平衡点最近的时刻,理想情况是角度、角速度过稳定平衡点的时刻,即角度最接近新的稳定平衡点、角速度接近零的时刻。

当运用发电机经典数学模型,以系统新的稳定平衡点作为状态空间的原点时,可用以下两式表示:

$$= \min (t) \quad t < 0 \quad (12)$$

$$\sim \min (\tilde{t}) \quad t < 0 \quad (13)$$

文献[16]给出了一种较为实用的在线算法。它将送受端明确的线路两侧等效为功率发送端 M 、接受端 N 两个系统,其重合闸安装示意图如图1所示,其中 L_1 为安装重合闸的线路, L_Q 为两系统的等值联络线。

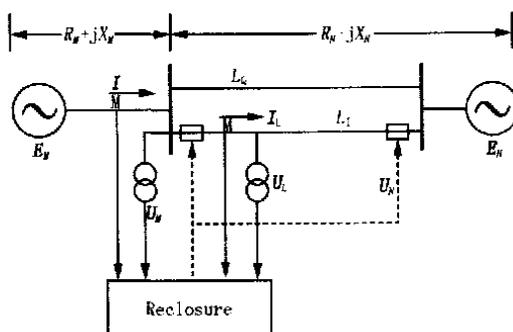


图1 重合闸安装示意图

Fig.1 Location of the reclosure

故障跳闸后实时采集 M 侧母线和线路三相电

压、电流,利用实测电压基波分量计算两侧等值电势

$$E_M = U_M + I(R_M + jX_M) = E_{MR} + jE_{MX} \quad (14)$$

$$E_N = U_N - I(R_N + jX_N) = E_{NR} + jE_{NX} \quad (15)$$

以及两侧功角

$$= \arctan\left(\frac{E_{MX} \cdot E_{NR} - E_{NX} \cdot E_{MR}}{E_{MR} \cdot E_{NR} + E_{MX} \cdot E_{NX}}\right) \quad (16)$$

连续计算可以得到 (t) 的离散值 (k) ,角度的微分即是角速度。考虑到发出重合命令到断路器合闸操作完成的延时 t_B ,利用公式(17)、(18)预测实测点 k 后 t_B 时点 p 的角度和角速度,当预测值满足式(19)时,瞬时故障重合;满足式(20)时,永久故障重合。

$$p = (k) + t_B \cdot (k) \quad (17)$$

$$p = (k) + t_B \cdot [(k) - (k-1)] / T_k \quad (18)$$

$$p-1 > p < p+1 \quad (19)$$

$$\begin{cases} k-2 < k-1 < k \\ p-1 > p < p+1 \end{cases} \quad (20)$$

文中给出了算法流程和模拟仿真验证。

此算法将网络等效为重合线路两侧的两个系统以及它们之间的等值联络线,采用发送功率端单端测量信息,结合瞬时与永久故障判定对送受端明确的线路不失为一种简单易行的在线算法。但是它所用到的大量离线等值运算,将会对潮流及结构经常改变的系統造成较大误差。

2.3 最佳重合时刻的离线计算及其整定

当今电力系统在单相瞬时与永久故障判定上已经较为完善,但对三相瞬时与永久故障的判定还没有比较可靠和已投入实用的判定方法;而且,现有电力系统大多还是采用的固定重合间隔时间。所以,如何在现有条件下充分利用最佳重合增强系统的稳定性,文献[20]给出了优化重合时刻的策略。

1) 根据不同的重合闸方式,在最严重的潮流方式下,在线路首(末)端施加各种接地、短路故障,分别计算不同重合时刻下系统的暂态能量。

2) 对应不同的重合闸方式,观察哪一种故障类型下系统的暂态能量曲线最高,在该曲线上找到最低值对应的时刻,这个时刻就是最佳重合时刻。

3) 按照新的线路重合时刻,对各种故障再进行一次验算,察看系统稳定性是否得到改善。

电力系统机组惯性,网架结构,系统运行方式,故障类型,故障发生地点以及重合闸操作所导致的网络变化这些不可控制因素对最佳重合时刻都有影响:机组惯性和网架结构不会频繁变动;重合闸操作

所导致的网络变化,是计算中已经考虑的问题;仿真计算表明,系统运行方式、故障类型和故障发生地点对最佳重合时刻影响较小,这些因素不会使通过上述方法所选定的最佳重合时间对系统造成不良的影响。

采取优化重合闸后线路的暂稳极限可以得到明显提高,相对于其他稳定控制手段,这无疑是一种低成本、高收益的措施。

最佳重合时间计算软件已经编制成功,它可以利用暂态能量函数法或者扩展等面积法(EEAC)离线计算最佳重合时间,并用西北网进行了校验计算。

2.4 重合时刻对轴系扭矩的影响研究

近年来随着现代电力工业的发展,汽轮发电机组功率迅猛增长,轴系变得相对细长,电气操作引起的机组扭振问题日益得到关注,特别针对发电厂送出线上由于重合闸操作引起的机组轴系扭振问题做了很多研究。文献[23]通过仿真计算指出:

1) 永久性故障下重合闸时刻对轴系扭振和发电机摇摆影响很大,并且故障类型不同,变化规律也不同。不同重合时刻下,成功重合对扭力矩峰值基本无影响。

2) 单相重合引起的扭力矩峰值和最大摇摆角都远小于三相重合闸,即使不成功的单相重合也没有成功的三相重合引起的扭振严重。

文献[24]建立了汽轮发电机轴系暂态能量函数,分析了重合闸操作时序对汽轮发电机组轴系扭振的影响,揭示了多次电气操作引起的轴系扭矩是因为在轴系振动期间又叠加了新的冲击,其影响取决于新冲击的大小和施加时刻;若选择合适的时刻完成最后一次电气操作,不仅不会加剧扭振反而会减弱原有的扭振。文献[25]给出了针对轴系扭矩理想重合时刻的判据,按照最后一次操作后能量函数值最小的原则,给出瞬时性故障和永久性故障下理想重合时刻的计算方法。

由于轴系扭振衰减时间常数一般很长(2.5~10 s),IEEE对减轻重合闸对汽轮发电机组轴系冲击的建议中有一项就是延长三相自动重合闸时间,一般建议10~15 s或者更长。对扭振尚未衰减时重合闸操作影响的研究显示,扭力矩出现最大值和最小值的时间只相差几毫秒,而电力系统所用的重合闸装置在发出重合命令到断路器触点接触往往需要几十毫秒,使捕捉最佳时刻失去意义。电力电子开关可以在1 ms以内实现开断,其优越的性能是传统高压断路器望尘莫及的。电力电子开关的应用,使捕捉

针对轴系扭振的最佳时刻成为可能。

3 新型重合闸方式的研究

3.1 自适应单相重合闸策略

利用耦合电压的单相自动重合闸期间瞬时与永久故障判定方法已经较为完善并投入实用,许继公司在其 WXB-803 型输电线路电流差动保护装置中加装了单相重合闸时瞬时与永久故障判定组件,避免重合于永久故障。

3.2 自适应分相重合闸方式

自适应分相重合闸的基本原理是,当发生故障的线路三相断开后,根据故障选相的结果,先重合其中一相,在一相或两相线路重合带电后,即可利用与自适应单相重合闸相似的方法识别故障是否消失。如果故障是永久性的,不再重合其他未合的相,并再次断开三相;反之,则重合发生故障的相,恢复线路正常运行。自适应分相重合闸方式,可以避免系统三相重合以及重合于多相永久故障,缓解重合操作对系统稳定性以及汽轮发电机组轴系扭振的影响。

文献[26,27]利用分相重合,配合耦合电压判据,用以解决多相故障时瞬时与永久性故障的判定。

文献[26]提出的分相重合逻辑针对发生故障后已经三相跳闸的线路:对于单相故障,首先考虑先合上一个距故障相最远的非故障相;对于三相故障,选择哪一相先合是任意的;对于两相相间短路,合上两故障相中任一相即可;对于两相接地短路故障,则应合上非故障相。根据线路一端一相合闸后线路侧的电压状态,判定其他相的瞬时与永久故障状态。

文献[27]提出的分相重合逻辑是:单相故障采用现有已经比较成熟的单相瞬时与永久故障判据。三相故障跳闸后,对于两相故障,选择非故障相首先重合,三相故障任意选择首合相,为瞬时或永久性故障判别提供判据。根据判别结果,决定第二相能否继续重合;若第二相重合成功,则利用附加判据判别能否合第三相。过程中任一判定为永久故障,闭锁未合相,跳开已合相。本文作者在文献[28]中,为了避免首合相重合于永久故障,进一步提出首合相判据:在对侧首先重合后,根据本侧断路器与母线不相连侧电压情况判定线路瞬时与永久故障。

文献[26]分相重合策略,判定简单易行;第二种重合策略更为安全但有些保守,在两相相间短路时,不如第一种方法易于判定。

为了缓解重合操作对汽轮发电机组轴系的冲击,基于 2.4 所列出的文献[23]的结论,文献[23]和

[29]同样提出了三相顺序分相重合的策略,仿真也证实了分相重合闸可以有效降低重合对轴系扭振的冲击,并有利于系统的稳定性。

3.3 自适应分相重合在同塔双回线上的综合运用

四川省电力公司和南京南瑞继保电气公司合作,以四川省同塔双回 500 kV 洪龙线为试验解决对象,研究了适用于同塔双回线的继电保护装置和方案,将瞬时与永久性故障的判定以及自适应分相重合运用于同塔双回线的重合闸方案中,并根据同塔双回线的特点做了适当的改进。

其分相重合方案要求保护只跳故障相,对于多相故障,分相顺序重合,先合的相合于故障或判定为永久故障则该线跳三相不再重合,重合成功再合其他相,避免了重合于多相故障。分相重合闸重合顺序如下:

1) 同名相优先重合且可以同时重合; 2) 多相故障的线路优先重合; 3) 超前相优先重合。

此方案能够尽快恢复缺相相的运行,并保证了各相优先重合的几率相同。

4 自适应重合闸的设想和展望

基于电网稳定性的需要、理论研究的不断完善和硬件平台的发展,自适应自动重合必将取代当前的自动重合闸。

当前,耦合电压判据配合自适应分相重合闸策略已经能够较好地地区分瞬时与永久性故障。最佳重合时刻的研究也取得了现实性的进展,在离线计算以及如何配合固定重合间隔时间方面的研究已经较为完善,将它们尽快投入实际运用中具有现实意义。

4.1 自适应重合闸的设想

在实际应用中,多相瞬时与永久故障的判定尚不能投入实用阶段,而且分相重合由于可以避免多相重合的冲击具有明显的优点,由此,我们可以对今后自适应重合闸方式做出初步构思。其重合策略为:

1) 单相故障,瞬时故障时重合;永久故障时,不重合。

2) 两相相间故障,任意跳开两故障相其中一相,判定瞬时与永久故障。

3) 两相接地故障,跳开两故障相,判定瞬时与永久故障;瞬时故障,重合两故障相其中一相,判定故障是否转化,决定是否重合第三相。

4) 三相故障,三相跳闸后,任意选定一相为首合相,首先重合(小)系统侧,判定机组侧或者大系统

侧是否重合。重合成功后,依次判定第二相、第三相是否能够重合。

在故障判定中,由于耦合电压判据较为简单实用,我们可以以此为主要判据,根据实际需要或者各种判据适用情况,利用其他判据作为辅助判据,确保能够正确重合并避免重合于严重永久性故障。

分相重合策略配合耦合电压判据,我们可以初步确定瞬时与永久故障。对于只能判定为非严重永久性故障的,我们可以按照永久性故障予以最佳重合。对于能够判定的瞬时故障,需要考虑最佳重合时刻如何配合分相重合的问题。

4.2 研究展望

通过以上对自适应自动重合闸现状的分析,自适应自动重合闸仍存在许多问题需要解决:

1) 从理论上讲虽然最佳重合可以在永久故障时有效阻尼系统振荡或削弱对汽轮发电机轴系的冲击,但是二次冲击对电力设备的冲击仍不可忽视,当前情况下,在能够判定为永久故障时是不会重合的。如何评价最佳重合在永久故障时的综合效益问题,仍需继续研究。

2) 在能够判定瞬时与永久故障的情况下,如何在线即时计算线路最佳重合时间仍是一个难题。虽然以上给出了一些最佳重合时间的算法,但其主要思想还是基于负荷及网络情况很少变动、能够获取全网信息的,用于离线计算的算法颇为实用;文献[16]给出的在线计算方法,也用到大量离线等效计算,忽略了系统运行方式变动;如果需要配合分相重合,上述方法就更为复杂了。在现有电力通信和硬件环境下,如何充分利用最佳重合计算装置安装处的系统信息,有效而准确地捕捉最佳重合时机是继续研究的发展方向。

3) 对于系统稳定性要求,我们有最佳重合时间予以优化;针对汽轮发电机组,也有最佳时刻以减弱对发电机轴系的冲击。如何综合考虑重合时刻对网络及大机组的影响,并同时有效避免系统过电压,也是重合闸研究的一个重要问题。

参考文献:

[1] 葛耀中(GE Yao-zhong). 新型继电保护与故障测距原理与技术(New Types of Protective Relaying and Fault Location with Their Theory and Techniques) [M]. 西安:西安交通大学出版(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 1996. 352-393.

[2] 葛耀中(GE Yao-zhong). 在单相自动重合闸过程中判别

瞬时和永久故障的方法(Method of Distinguishing Between Instant and Permanent Fault During Single-Phase Reclosing) [J]. 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 1984, 18(2): 23-31.

- [3] GE Yao-zhong, SUI Feng-hai, XIAO Yuan. Prediction Methods for Preventing Single-phase Reclosing on Permanent Fault [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [4] 范越,施围(FAN Yue, SHI Wei). 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正(Modification of Voltage Criterion in the Single-pole Automatic Reclosing of Transmission Lines) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(6): 44-47.
- [5] 葛耀中,索南加乐,孔繁鹏,等(GE Yao-zhong, SUONAN Jia-le, KONG Fan-peng, et al). 微机自适应单相重合闸的判据和算法(The Criterion and Algorithm of Single-phase Adaptive Reclosure Based on Micro-processor) [J]. 继电器(Relay), 1995, 23(2): 7-9.
- [6] 郑玉平,黄震,沈军,等(ZHENG Yu-ping, HUANG Zhen, SHEN Jun, et al). 同杆并架双回线自适应重合闸的研究(Research on Self-adaptive Auto-reclosing for Parallel Transmission Lines) [A]. 2003年亚洲继电保护和控制学术研讨会(Asian Conference on Power System Protection). 2003. 10: 105-110.
- [7] 李斌,李永丽,曾治安,等(LI Bin, LI Yong-li, ZENG Zhi-an, et al). 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸(Study on Single-pole Adaptive Reclosure Based on Analysis of Voltage Harmonic Signal) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2002, 26(10): 53-57.
- [8] 葛耀中,肖原(GE Yao-zhong, XIAO Yuan). 超高压输电线路自适应三相自动重合闸(Self-adaptive Three-phase Reclosure for EHV Transmission Line) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 1995, 19(2): 10-18.
- [9] 林湘宁,朱海昱,刘沛(LIN Xiang-ning, ZHU Hai-yu, LIU Pei). 基于模糊综合决策的自动重合闸优化判据的研究(The Study on Optimal Automation Reclosing Criteria Based on Fuzzy Synthetic Decision) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(9): 31-34.
- [10] 蔡超豪(CAI Chao-hao). 基于小波分析的自适应重合闸(Adaptive Auto-reclosing for Transmission Line Based on Wavelet Packet Transform) [J]. 继电器(Relay), 1999, 27(2): 21-23.
- [11] 房鑫炎,郁惟镛,王志华(FANG Xin-yan, YU Wei-yong, WANG Zhi-hua). 多层人工神经网络在自适应重合闸首合相及次合相判别中的应用(The Application of the Multi-layer Artificial Neural Network in the Identification of the First reclosing Phase and the Second-reclosing Phase of Adaptive Reclosure) [J]. 继电器(Relay), 1999, 27(2): 17-20.

- [12] 房鑫炎,郁惟镛,王志华(FANG Xin-yan, YU Wei-yong, WANG Zhi-hua). 基于发展性故障的自适应重合闸合闸相序的判别(The Determination of Reclose Phase in Adaptive Reclose Protection on Developing Fault) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 1999, 19(2): 18-20.
- [13] 郁惟镛,胡炎,黄登峰(YU Wei-yong, HU Yan, HUANG Deng-feng). 基于波形识别的永久性和瞬时性故障的判别(Research of Self-adaptive Reclose Based on Wave Identification) [J]. 继电器(Relay), 1999, 27(4): 10-13.
- [14] 王梅义,吴竞昌,蒙定中(WANG Mei-yi, WU Jing-chang, MENG Ding-zhong). 大电网系统技术(The System Technology of Large Power Grid) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1991.
- [15] 张保会,袁越,薄志谦(ZHANG Bao-hui, YUAN Yue, BO Zhi-qian). 最佳重合闸时间及其整定计算(Optimal Reclosing Time and Its Setting Calculation) [J]. 中国电力(Electric Power), 1995, 28(2): 12-16.
- [16] 张保会,康小宁,薄志谦(ZHANG Bao-hui, KANG Xiao-ning, BO Zhi-qian). 发电厂送出线重合闸时机的优选与捕捉(Optimal Autoreclosure and Its Application Technique) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1995, 15(3): 173-178.
- [17] 张保会,雷敏,袁宇春(ZHANG Bao-hui, LEI Min, YUAN Yu-chun). 优化重合闸时间提高网络传输能力(Optimizing the Reclosing Time to Improve the Transmission Capacity of Power Network) [J]. 继电器(Relay), 1998, 26(1): 17-21.
- [18] 袁宇春,张保会,钱国明(YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui, QIAN Guo-ming). 多机电力系统中重合闸最佳时刻的研究——第1部分 瞬时性故障最佳重合时刻的研究(Study on the Optimal Reclosing Time in Multi-machine Power System—Part One: Study on the Optimal Reclosing Time at Instantaneous Fault) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(4): 16-18.
- [19] 袁宇春,张保会,阎海山(YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui, YAN Hai-shan). 多机电力系统中重合闸最佳时刻的研究——第2部分 永久性故障最佳重合时刻的研究(Study on the Optimal Reclosing Time in Multi-machine Power System—Part Two: Study on the Optimal Reclosing Time at Permanent Fault) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(6): 46-48.
- [20] 吴洋,张保会(WU Yang, ZHANG Bao-hui). 优化重合闸时刻的策略与效益(Strategy and Benefit of Optimizing Reclosing Time) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 2002, 22(8): 12-15.
- [21] 杨小煜,张保会,吴杏平(YANG Xiao-yu, ZHANG Bao-hui, WU Xing-ping). 最佳重合时间整定计算软件的实现(The Realization of Setting Software on Optimal Reclosure Time) [J]. 继电器(Relay), 2000, 28(4): 13-15.
- [22] 杨小煜(YANG Xiao-yu). 输电线路最佳重合闸时间的研究与软件实现(硕士学位论文)(Study of the Optimal Reclosure Time of Transmission Line and Software's Realization, Thesis) [D]. 西安:西安交通大学(Xi'an: Xi'an Jiaotong University), 1999.
- [23] 袁越,张保会,葛耀中(YUAN Yue, ZHANG Bao-hui, GE Yao-zhong). 发电厂送出端采用高速重合闸影响的分析研究(Studies on the Effects of High speed Reclosure Adopted by Transmission Lines Directly Connected with Generators) [J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the EP-SA), 1996, 8(2): 7-13.
- [24] 张保会,余颖辉(ZHANG Bao-hui, YU Ying-hui). 电气操作对机组轴系扭振的影响机理(Analysis for the Effect of Electrical Operation on Turbine Generator's Shaft Torsional Oscillation) [J]. 电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2001, 21(8): 24-28.
- [25] 张保会,余颖辉(ZHANG Bao-hui, YU Ying-hui). 重合时刻对机组轴系扭振的影响(Study on the Effect of Reclosing Time on Turbine Generator Shaft Torsional Oscillation) [J]. 电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2001, 21(9): 5-7.
- [26] 黄莹,葛耀中(HUANG Ying, GE Yao-zhong). 自适应分相重合闸的判据及其仿真计算(The Criterion of Self-adaptive Sequential Reclosure and Its Simulation Calculation) [J]. 继电器(Relay), 1996, 24(4): 4-8.
- [27] 郁惟镛,房鑫炎,王山虎,等(YU Wei-yong, FANG Xin-yan, WANG Shan-hu, et al). 自适应重合闸的机理及仿真计算(Function and Simulation Calculation of Adaptive Reclose) [J]. 上海交通大学学报(Journal of Shanghai Jiaotong University), 1996, 30(9): 63-68.
- [28] 房鑫炎,郁惟镛,王曼(FANG Xin-yan, YU Wei-yong, WANG Man). 自适应重合闸中首合相判据的分析(Research on First-reclose Phase Judgment of Adaptive Reclose) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 1997, 17(3): 21-23.
- [29] 袁越,葛耀中,张保会(YUAN Yue, GE Yao-zhong, ZHANG Bao-hui). 自适应分相重合闸对机组轴系扭振和系统暂态稳定影响的研究(Effect of Adaptive Sequential Reclosure on Shaft Torsional Oscillation and Power System Transient Stability) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(5): 19-22.
- [30] 袁越,张保会(YUAN Yue, ZHANG Bao-hui). 电力系统自动重合闸研究的现状与展望(Present State and Prospects of Power System Automatic Reclosure Research) [J]. 中国电力(Electric Power), 1997, 30(10): 44-47.

收稿日期: 2003-11-28; 修回日期: 2004-01-13

作者简介:

郭相国(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统

稳定控制; E-mail: Guoxiangguo@163.com

张保会(1953-),男,教授,博士研究生导师,主要研究电力系统安全稳定紧急控制、新型继电保护、电力系统自动化和电力系统通信。

Present achievements and prospects of adaptive auto-reclosure

GUO Xiang-guo, ZHANG Bao-hui

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The criteria proposed to distinguish transient faults from permanent ones and the sequential reclosure strategy make it possible to avoid reclosing on permanent faults or transient ones in single-phase or multi-phase faults. The theoretical analysis and online algorithm of the optimal reclosure have been developed well. Based on the review of the adaptive auto-reclosure, the prospective trends are described.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50277027), and XI Education Bounty of China Electricity Fund.

Key words: adaptive auto-reclosure; distinguishing transient faults from permanent faults; optimal reclosure time; sequential reclosure

(上接第 59 页 continued from page 59)

南京路变电站原主变保护为南瑞继电保护公司 RCS-978E 型微机保护,可输入四侧电流即具备四侧差动保护功能,考虑其软件已定型,因此本次改造中主变差动保护配置暂选择方案一,但方案一并不是最佳配置方案,因为在实际运行中无法带负荷测量 Z 型接地分支 CT 相量图,可能因 CT 极性错误导致区外故障差动保护误动。

4 结论

本文结合青岛电网 220 kV 南京路站 35 kV 配电网的改造工程,对南京路 Z 型变设置方案及容量选择、运行操作等方面需注意的问题进行了详细的论述。认为对于双母线接线且并列运行的变电站,选择 Z 型接地变的容量时需考虑满足运行操作的需要,最大容量不宜超过 3 200 kVA。对于中性点经小

电阻接地系统,正常运行中也必须加强对接地信号的监视。文章在对有 Z 型接地变的主变压器差动保护几种配置方案分析比较的基础上,提出了一种新的差动保护方案,以期对微机保护生产厂家有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 李延强,李锦敏,贾长朱,等(LI Yan-qiang, LI Jin-min, JIA Chang-zhu, et al). 天津配电网低电阻接地保护方式及整定计算的探讨(Discussion on Low Resistance Earth Protection Mode and Its Setting Calculation in Tianjin Distribution Network)[J]. 继电器(Relay),1998,26(2):38-42.

收稿日期: 2003-11-25; 修回日期: 2004-01-11

作者简介:

于立涛(1974-),女,工程师,主要从事继电保护计算、运行及管理工作。E-mail: yuz520@163.com

Analysis of improving scheme for neutral grounding via low resistance in 35 kV distribution network

YU Li-tao

(Dispatching Department, Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266002, China)

Abstract: The capacitive current level in 35kV system of Nanjing road substation is too high, and the neutral grounding via arc suppression coil is liable to cause some problems. According to this situation, there are two improving schemes about grounded neutral system via low resistance, with which delta-connected side of the transformer may be grounded by adding Ztype grounding transformer and neutral resistor. With the characteristics of double busbars being in parallel in 35kV system of Nanjing road substation, some problems about the arrangement, capacity selecting and operation of Ztype grounding transformer are discussed. By analyzing and comparing several schemes for transformer differential protection in grounded neutral system via low resistance, a new transformer differential protection scheme suited for the grounded neutral system via low resistance is put forward.

Key words: neutral grounding; low resistance; distribution network