

基于潮流转移的后备保护系统容错控制研究

王向东, 王 勋

(华东交通大学 电子与电气工程学院 江西 南昌 330013)

摘要: 针对威胁电网安全运行的连锁跳闸问题, 分析了现有后备保护存在的缺陷, 提出了一种基于潮流转移的继电保护系统的鲁棒容错控制方案和用于估算发生潮流转移后电网动态潮流计算方法, 提出了鲁棒容错后备保护方案. 在新英格兰 10 机 39 节点系统运用 PSASP 进行了潮流转移仿真, 结果表明该后备保护方案具有良好的识别潮流转移能力.

关键词: 容错控制; 后备保护; 潮流转移; 电力系统

中图分类号: TM773

文献标识码: A

随着电力需求的不断增长, 系统负荷的增大和电网结构的日趋复杂给继电保护提出了更高的要求. 在继电保护装置中, 结构越复杂, 触点越多, 其可靠性越难保证. 容错控制技术作为提高控制系统可靠性的一种重要手段, 目前已应用到电力设备的许多领域. 当前的应用主要集中在电厂的控制系统、发电机的非线性励磁系统、输配系统的无功补偿及监控等. 但在继电保护领域的应用, 目前的研究还很少^[1].

对 20 年来世界各国大停电事故的分析表明, 虽然每次大停电的背景与演化过程各有不同, 但其发展过程都包含一个共同因素, 即潮流转移引起的连锁跳闸, 使系统运行状况进一步恶化, 直至最终崩溃. 虽然在大停电事故中, 继电保护都能按照其整定和配置要求正确动作, 但传统的保护装置仅利用本地信息而达到尽快清除被保护元件故障或不正常运行状态的目的, 无法区分故障与潮流转移造成的过负荷, 难以阻止线路陆续过载而引起的连锁跳闸事件^[2]. 因此对由于线路发生故障保护动作后的潮流转移引起的过负荷进行鲁棒容错控制, 以避免扩大停电范围而造成大停电事故进行研究有着重大意义. 本文将鲁棒控制技术引入到继电保护系统中, 对故障线路切除引起潮流在同一或不同输电断面间转

移的保护系统的容错进行研究, 并提出一个适当的鲁棒容错控制方案.

1 鲁棒容错控制系统的概述

容错控制(Fault-Tolerance Control)是对可能出现故障的系统采取某些方法进行控制, 使其在无故障和有故障两种情况下都能满足系统的性能指标. 容错控制系统又可以分为“主动式”和“被动式”两种不同的结构方案^[3].

1) 主动容错控制 主动容错控制系统通过算法设计自适应地在线辨识故障参数, 或者利用故障诊断机构获取故障信息, 如故障发生的位置和故障的程度等. 主动容错控制大致可以分成三大类: 控制律重新调度、控制器重构设计、模型跟随重组控制.

控制律重新调度基本思想是离线计算出各种故障下所需的合适的控制律的增益参数, 并列表储存在计算机中. 控制律重构方法不改变控制器的结构, 通过调整控制器参数实现容错控制, 当基于在线得到了最新的故障信息后, 就可以挑选出一个合适的增益参数, 得到容错控制律.

控制器重构设计的基本思想是在系统运行过程中, 某些故障发生后破坏了与当前控制相适应的环

境,必须重组能适应于新环境的控制器。

模型跟随重组控制的基本原理是采用模型参考自适应控制的思想,使得被控过程的输出始终自适应地跟踪参考模型的输出,而不管是否发生了故障。

2) 被动容错控制 通过设计固定控制器来保证设备对故障的不敏感性,它是一种基于故障检测、故障屏蔽和故障系统重组技术的容错控制。从设计思想上看类似于鲁棒控制技术,因而不需要故障检测和诊断子系统。

从容错控制的对象来看,由于构成一个控制系统的典型环节包括控制器、检测元件及传感器、执行器以及被控对象,所以对不同环节的考虑理论上都可以衍生出特定的容错控制问题。被控对象故障容错控制能够适应被控对象的参数在一定范围内变化、甚至对象特性结构性变化的控制方案,既属于容错控制研究的问题,同时与自适应控制、鲁棒控制等都有内在的联系。

鲁棒容错控制方法主要是设计一个鲁棒控制器使系统对某些部件故障不敏感。通常地鲁棒控制器设计为一个定常控制器,该控制器除考虑正常工作状态的参数之外,还要考虑各种故障情况下的参数值。典型的鲁棒容错控制设计方法有:多重系统同时稳定性设计方法、完整性设计方法、参数空间设计方法、自适应设计方法及近年来发展的 H_∞ 设计方法^[4]。本文仅就被控对象(线路故障被切除后的潮流转移的后备保护控制)自适应设计方法的鲁棒容错控制进行研究。

2 基于潮流转移的继电保护的鲁棒容错控制

当电力系统中某条联络线因故障被切除后,其网络拓扑结构发生变化,其上的潮流将被转移到系统中其他正常运行的联络线上,可能引起正常线路的过载。以图1所示的3机简单系统为例进行分析。

2.1 不计及暂态过程的潮流转移分析

当线路 L_2 发生故障(或误操作)被切除后,其上的潮流将转移到其它线路上,即线路 L_1 、 L_3 和 L_4 上。故障前的潮流分布可实测获得,此时如果不考虑机电暂态过程,可以用静态分析方法估算出故障后各线路上的潮流,通过比较实测故障后的潮流与估算值对比,就可以分辨出这些线路上是否发生潮流转移而引起过负荷还是线路短路故障,从而采取正确的继电保护容错方案。

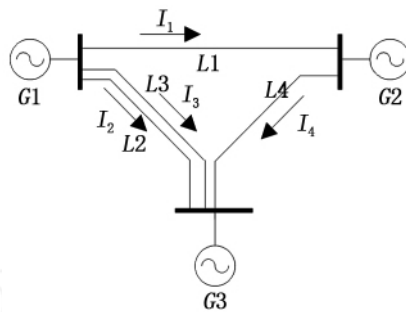


图1 故障前的潮流分布情况

对于图1中因 L_2 支路被切除后对其他线路上的潮流转移的估算方法分析如下。

假设发生支路切除事件前后网络各节点的注入电流不变,即发电机、负荷接入网络的电流在发生支路切除事件前后不变的情况下,当 L_2 故障切除后,网络参数可看作为一个恒定的常数,因此转移潮流分量与激励源成线性关系。电网中某一支路切除后,该支路上的原有潮流将按照一定的比例转移到电网中的其它支路上,因而可以得到从切除支路到另一条支路的潮流转移比例函数,它是一个仅与网络支路参数有关的函数,与激励源的大小无关。文献[5]提出了一种基于 WAMS 的具有识别潮流转移能力的广域后备保护方案,引入了用于估算发生潮流转移后电网潮流分布的 FTRF(潮流转移因子)的概念,网络中所有支路之间的转移因子后,可形成网络的潮流转移因子矩阵如下。

$$\Gamma_{b^*b} = \begin{pmatrix} - & \tau_{12} & L & \tau_{1b} \\ \tau_{21} & - & L & \tau_{2b} \\ M & M & OM & \\ \tau_{b1} & \tau_{b2} & L & - \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 τ_{ki} 表示切除支路 i 后支路 i 相对于支路 k 的潮流转移因子。但对于如何在判据中引入节点注入电流的变化以及减小判据的暂态误差,没有进行论述。

2.2 计及暂态过程的潮流转移分析

实际电网从支路切除事件前的稳态过渡到支路切除事件后的稳态,必须经历一个机电暂态过渡过程,使得电网各节点的注入电流(发电机、负荷电流)必然会发生变化,这导致按上述计算潮流转移后的电网潮流分布有一定的误差,将电力系统中的发电机、负荷电流都作为节点注入电流来表示,系统可看成线性网络(不计系统中的电力电子等非线器件),可以列出网络的节点电压方程^[6]

$$I_N = Y_N V_N \quad (2)$$

其中 I_N 为节点注入电流向量, V_N 为节点电压

向量; Y_N 为网络节点导纳矩阵, 可以根据网络的节点关联矩阵 A 和支路导纳矩阵 Y 得到

$$Y_N = AY(s)A^T \quad (3)$$

支路电流 I_B 与节点电压之间的关系可表示为

$$I_B = Y(s)A^T V = Y(s)A^{T-1}I_N \quad (4)$$

则支路为 k 的支路电流与节点注入电流间的线性关系

$$I_{kB} = \lambda_{k1}I_{1N} + \lambda_{k2}I_{2N} + L + \lambda_{kn}I_{nN} + \quad (5)$$

可以看出, 支路电流与节点注入电流之间为线性关系, 将支路电流与节点注入电流间的线性系数矩阵称作网络相关度系数矩阵, 记为 $C(\lambda)$, 以 λ_{ij} 表示矩阵中的元素. 可见支路电流与节点注入电流间的相关度系数矩阵 $C(\lambda)$ 仅与网络的拓扑结构以及网络参数相关, 不会受到支路电流及节点注入电流变化的影响. 相关度系数矩阵 $C(\lambda)$ 具有以下特点:

(1) 相关度系数矩阵 $C(\lambda)$ 仅与网络参数及拓扑结构相关, 不会受到支路电流和节点注入电流变化的影响;

(2) 对于线性网络来说, 节点注入电流引起支路电流的变化量必然小于节点注入电流自身的变化量, 因此, 系数矩阵 $C(\lambda)$ 中: $|\lambda_{ij}| \leq 1$;

(3) 对于第 k 条支路来说, 其上的电流 I_{kB} 与节点 i 注入电流的相关度为 λ_{ki} , 即 $|\lambda_{ki}|$ 越大, 节点 i 注入电流变化对支路 k 上电流的影响也越大;

(4) 对于第 k 条支路来说, 当节点 i 注入电流与支路 k 电流的相关度系数 λ_{ki} 的实部为正时, 则节点注入电流减小对应于支路电流的减小; 反之则节点注入电流增大对应于支路电流的减小.

由于实际电网中存在的节点和支路数量庞大, 因而造成上面的矩阵维数很高, 如此多的数据会导致计算量过大, 时间上很难满足保护和控制装置的需要. 因此, 需要对节点注入电流变化量有所取舍. 对于一个大的电网来说, $C(\lambda)$ 是一个大阶数矩阵, 而就其每一行而言, 绝大多数项的值都很小, 这说明对大电网中的某一支路而言, 只有很少的几个节点注入电流的变化才会对该支路电流产生较大的影响, 这也完全符合实际电力系统的特性.

假设网络中支路 i 切除事件发生在 t_1 时刻, 将发生支路切除事件前的网络以 $N1$ 表示, 发生支路切除事件后的网络以 $N2$ 表示. t_1 时刻前网络 $N1$ 稳态运行时的支路电流向量以 I_M 表示, 节点注入电流以 I_{N1} 表示. t_2 时刻的节点注入电流以 I_{N2} 表示. 以网络中任一支路 k ($k \neq i$) 为例, 根据文献 [6] 可推导出

支路 k 上的电流 I_{kB2} 为:

$$I_{kB2} = I_{kM} + \tau_{ki}I_{iM} + (C_{kn}(\lambda) + \tau_{ki}^* C_{in}(\lambda))(I_{N2} - I_{N1}) \quad (6)$$

其中 I_{kM} 、 I_{iM} 分别为 I_M 的第 k 个和第 i 个元素, 即网络 $N1$ 中支路 k 和支路 i 在 t_1 时刻前的稳态电流; $C_{kn}(\lambda)$ 与 $C_{in}(\lambda)$ 分别为相关度系数矩阵 $C(\lambda)$ 的第 k 行和第 i 行. 上式中仅右边的最后一项与测点的选取有关, 该项为行向量 $C_{kn}(\lambda)$ 和 $\tau_{ki}^* C_{in}(\lambda)$ 中的元素与发生支路切除事件前后节点注入电流变化量的乘积之和, 当 $C_{kn}(\lambda)$ 和 $C_{in}(\lambda)$ 中的元素或节点注入电流变化量过小时, 其乘积将不会对支路 k 上电流的计算产生较大的影响. 因此, 可以根据行向量 $C_{kn}(\lambda)$ 和 $C_{in}(\lambda)$ 中各项元素的大小来选取相应的节点 L 注入电流测点, 舍去其中较小的项. 则 (6) 式可近似为

$$I_{kB2} = I_{kM} + \tau_{ki}I_{iM} \sum_L \lambda_{ki}(I_{LN2} - I_{LN1}) + \tau_{ki}^* C_{in} \sum_L \lambda_{ki}(I_{LN2} - I_{LN1}) \quad (7)$$

其中所选节点 L 应满足在向量 $C_{kn}(\lambda)$ 或 $C_{in}(\lambda)$ 中对应的项 λ_{kL} 或 λ_{iL} 较大; 所选节点 L 应存在接入功率较大的发电机或负荷, 可加速潮流转移后其他过负荷联络线的潮流计算速度.

3 潮流转移后后备保护的鲁棒容错方案

基于模型的控制系统的故障检测方法大部分都需要人为给定阈值(门限). 对于某一类故障设定一个门限值 λ , 即若 $H_0: \theta_i < \lambda$, 则系统无故障; 若 $H_1: \theta_i < \lambda$, 则系统出现故障. 如果 λ 偏大, 则漏报率增大; 若 λ 偏小, 则误报率增加. 因此阈值的选取是否适当是非常重要的.

因此, 若电网中支路 k 由于潮流转移所引起的过负荷而导致后备保护启动, 可以根据式 (7) 来计算 t_2 时刻支路 k 上的电流分布情况. 因此, 通过比较支路 k 在 t_2 时刻的计算电流 I_{kE} 与 t_2 时刻的在线测量电流 I_{kM} , 可构成潮流转移识别判据

$$|I_{kM} - I_{kE}| \leq \lambda |I_{kE}| \quad (8)$$

其中 λ 为式 (7) 中不完全计及所有节点注入电流所造成误差的门槛值, 可以根据行向量 $C_{kn}(\lambda)$ 和 $C_{in}(\lambda)$ 中实部全部为正(或负)的项以及这些项所对应节点的注入电流最大变化量进行取值. 并计及一定的裕度. 经过仿真分析, 为提高后备保护控制的鲁棒性, 判据中 λ 的取值宜选为 5%. 当不等式成立时, 将判定保护的启动是由潮流转移所引起. 这时应当在元件未达到其热稳定极限前正确地闭锁保护,

然后采取相应的容错控制措施。

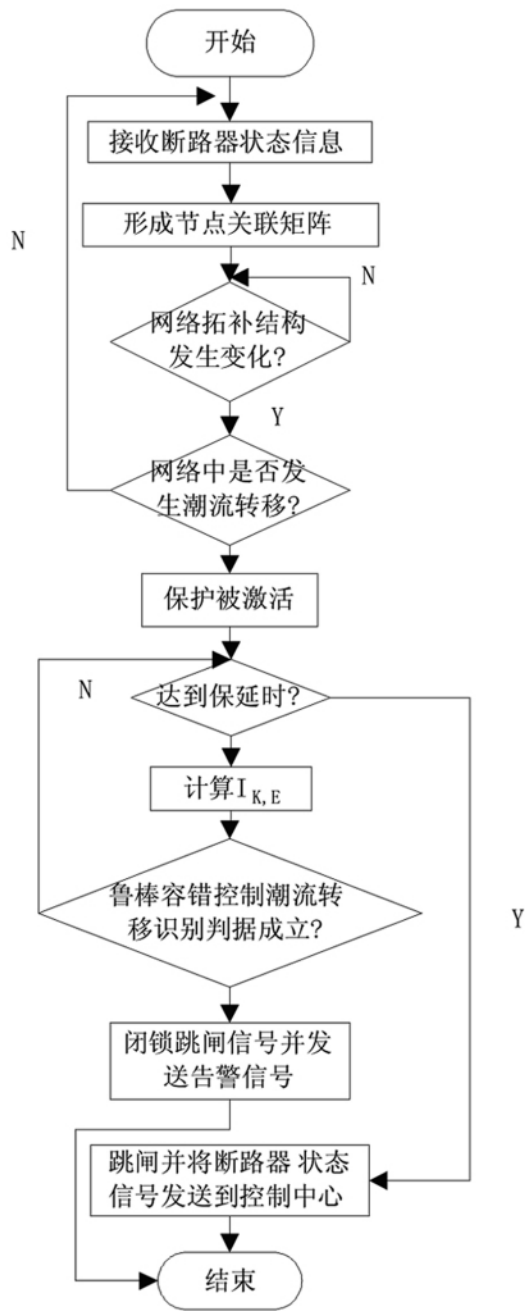


图 2 鲁棒容错控制流程图

后备保护系统根据分布在电网中的保护装置收到支路切除信息后,潮流转移识别判据将被激活,保护启动后,其原有功能保持不变,即保护在达到规定的延时之后发出跳闸信号。对于后备保护来说,其跳闸延时一般为 0.5 s 以上,因此有足够的时间接收来被切除支路编号及其切除前的电流值,即可计算出网络拓扑发生变化后的电流,并进入鲁棒容错潮流转移判据。若判据成立,保护将在到达支路热稳定极限前闭锁跳闸信号,以防止过载支路的切除导致系统情况的进一步恶化;同时,向发送支路过载告

警信息。若判据不成立,将由常规保护完成支路的保护。鲁棒容错后备保护控制流程如图 2。

4 算例仿真

采用新英格兰 10 机 39 节点系统对提出的计及暂态过程的潮流转移识别算法进行仿真验证,仿真软件为 PSASP,仿真系统的单线图及其支路编号如图 3。

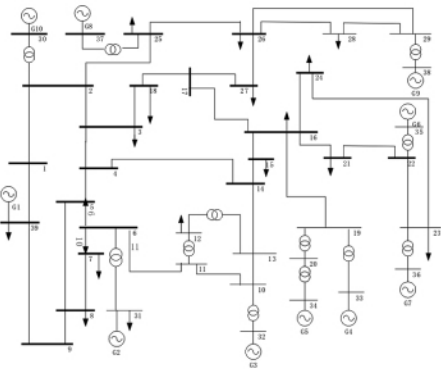


图 3 新英格兰 10 机 39 节点仿真系统

设定线路 L11 在母线 7 侧线路出口处发生永久三相接地故障,并在 5 周波时线路被切除。由于 L11 相对于线路 L9 和 L10 的转移因子最大(如表 1 所示),因此在线路 L11 切除后,L11 上潮流的主要转移对象为 L9 和 L10。以 L9 为例,其支路电流与节点注入电流之间的相关度系数矩阵的数据如表 2 所示。引入所有的发电机节点 N30~N39 和相关度系数较大的负荷节点 N4、N7 和 N8 的注入电流变化量作为判据测点, $|I_{9,M}-I_{9,i}|$ 表示测量电流与计算电流间的差值,表 3 中列出了仿真电流和计算电流的比较结果。

表 1 转移因子的数据

支路编号 i	9	10	11
$L11(\tau_{i,11})$	$0.9294 - 0.0003 i$	$0.9311 + 0.0003 i$	—

表 2 相关度系数矩阵的数据

支路编号 i	$\lambda_{9,i}$	支路编号 i	$\lambda_{9,i}$
4	$-0.1209 - 0.0001 i$	34	$0.0019 - 0.0014 i$
7	$0.1957 + 0.0044 i$	35	$0.0018 - 0.0014 i$
8	$0.0352 + 0.0021 i$	36	$0.0018 - 0.0014 i$
30	$-0.0428 - 0.0010 i$	37	$-0.0391 + 0.0011 i$
31	$0.5164 + 0.0023 i$	38	$-0.0263 + 0.0003 i$
32	$0.3090 + 0.0004 i$	39	$-0.0022 + 0.0008 i$
33	$0.0019 - 0.0014 i$		

表 3 仿真电流和计算电流的比较

	故障前电流	稳态电流	两者最大差值
仿真电流幅值	—	5 039.3	4 565.9
计算电流幅值	2 776.5	5 020.9	4 503.1

在 $L11$ 发生故障并被切除后,由于潮流的转移,线路 $L9$ 的电流存在大幅度的突增,随后进入了暂态衰减过程。虽然系统暂态过程中发电机之间的功角摆动基本都在 20° 左右,但是在引入发电机节点和负荷节点对网络的注入电流后, $L9$ 的潮流能收敛从而计算出 $L9$ 上的暂态电流。根据识别判据有

$$|4\,565.9 - 4\,503.1| = 62.8(A) < 0.05 * 4\,503.1 = 225.15(A)$$

可见,计算结果满足潮流转移判据条件,因此,广域后备保护装置将发出闭锁信号,从而避免了线路 $L9$ 因潮流转移引起的误切除。

5 结语

电力系统故障切除后由于潮流转移很可能会引起连锁跳闸事故发生,将严重影响电力系统的安全可靠运行。本文在分析传统后备保护装置在潮流转

移过程中所存在缺陷的基础上,提出了基于自适应的鲁棒容错的具有识别潮流转移能力的后备保护方案,引入了潮流转移识别判据用于判别是线路故障还是由于潮流转移引起的过电流,以便及时闭锁保护以避免误动作。最后,通过对新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真验证了该鲁棒容错的后备保护方案的可行性。

参考文献:

- [1] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
- [2] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11.
- [3] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制技术[M]. 清华大学出版社, 2000.
- [4] 葛建华, 孙优贤. 最优鲁棒容错控制的设计[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(5): 630-633.
- [5] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 杨奇逊. 基于 WAMS 的潮流转移识别算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 14-19.
- [6] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.

Robust Fault – tolerance Control of Backup Relay Protection Based Flow Transfer

WANG Xiang – dong ,WANG Xun

(School of Electric and Electronic Engineering ,East China Jiaotong Uni. ,Nanchang 330013 ,China)

Abstract: In view of the cascading trip induced by backup relays that affects the safe operation of the system and may even cause blackout, after investigating the defects of the existing backup protection, this paper presents a robust fault – tolerance control by backup relay protection scheme based on identifying the flow transfer and proposes to estimate the dynamic flow distribution after flow transfer occurs. The simulation in a New – England 10 – machine 39 – node network by the sofesare of PSASP shows that the backup protection strategy proposed to identify flow transfer works well.

Key words: robust fault – tolerance control; backup protection; flow transfer; power systems

(责任编辑: 王建华)