第 39 卷　第 24 期　2015 年 12 月 25 日
DOI：10.7500/AEPS20150303002
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.39 No.24 Dec.25，2015

地区电网计及备自投的 $N-1$ 静态安全分析快速计算方法

潘凯岩[1]，谭大帅[1]，赵　勇[1]，李俊格[2]，高　强[2]
（1. 东方电子股份有限公司，山东省烟台市 264000；2. 广州供电局有限公司，广东省广州市 510620）

摘要：地区电网由于其自身的特点在进行实时 $N-1$ 分析时通常会引起大量的备自投动作，传统的方法在进行 $N-1$ 分析时，先对具体的故障进行模拟，然后进行拓扑分析，再进行考虑备自投动作后的拓扑分析。整个过程涉及频繁的开关操作从而要进行大量的拓扑计算。根据地区电网的特点提出了两种考虑备自投的实时 $N-1$ 计算方法，该方法分别是通过供电路径搜索或预先建立 $N-1$ 故障与动作的备自投的映射关系，在潮流校核过程中通过负荷转移的方法将负荷从工作母线转移到备用母线来模拟备自投的动作。该方法不需要改变电网的基本拓扑关系，从而大大地缩短了计算时间，现场运行情况表明所提出的方法是可行的，可以更高效地对电网进行 $N-1$ 分析。

关键词：静态安全分析；$N-1$；负荷转移；备自投；供电路径搜索

0　引言

随着地区电网的高速发展和电网商业化运行的深入开展，电力系统的调度和控制变得越来越复杂。因此对供电可靠性提出了越来越高的要求，这也使静态安全分析的 $N-1$ 功能在地区电网中得到了越来越广泛的应用[1-2]。

地区电网的特点是其管辖范围通常包括 220 kV 及以下的主变压器（以下简称主变）和线路及部分 500 kV 主变。其中 220 kV 线路一般以环网供电方式运行，110 kV 设备通常按辐射网供电方式运行。为保证供电可靠性，需在变电站内安装一定数量的备自投（BATS）。当电网发生故障从而导致母线停电时，满足条件的备自投就会动作，为停电母线恢复供电，从而保证了供电的可靠性。

因此，在地区电网进行安全分析时，必须考虑备自投的动作，来确定事故后新的状态下电网是否满足安全性的要求。如果不考虑备自投的动作，分析结果通常为甩负荷，这与电网的实际运行情况不一致，计算结果也没有参考价值。文献[3]提出了在能量管理系统（EMS）/调度员培训仿真系统（DTS）中考虑自动装置的一种方案。

地区电网的 $N-1$ 分析通常是周期进行计算的，随着电网规模不断扩大，对 $N-1$ 的运算速度提出了越来越高的要求，为缩短计算时间，传统的方法是对 $N-1$ 故障进行筛选，按一定的性能指标过滤掉一些引起设备越限概率较小的故障[4-6]。另一方面，在地区电网中，大部分故障都会导致备自投动作，由于地区电网的备自投配置可能存在差异，同时有些电网存在诸如 T 结线及线变组结线等特殊接线方式等，在模拟分析时为了确定某个设备故障会引起哪些备自投动作，单纯通过备自投的动作逻辑是无法进行判断的，必须要经过拓扑分析才能得到。一般地，有备自投动作的故障都需要重新进行拓扑计算然后再进行潮流校核，从而会消耗较长的计算时间，为此，本文针对地区电网的特点，提出了两种新的处理方法，该方法分别是通过供电路径搜索或预先建立 $N-1$ 故障与动作的备自投的映射关系，在潮流校核中通过负荷转移的方法将负荷从工作母线转移到备用母线来模拟备自投的动作。由于本方法不需要进行频繁的拓扑计算，从而可以大大缩短计算时间。

1　备自投建模

文献[7]给出了针对 $N-1$ 的各种备自投模型的定义。通常不同的厂家需要根据其数据库的特点对备自投进行建模。但都需要考虑备自投的方向性、时序性、均分性等特点。本文根据备自投的特点将模型分为备自投条件表和备自投动作表。其中备自投条件表包括备自投类型（母联备投或设备备投）、包含的设备（线路或变压器）、开关、母线，如图 1 所示（图中开关空心表示断开，实心表示闭合，下同），设备最多可以指定 4 个，用户可以设置条件表（条件表一般包括设备带电、设备不带电及开关热

收稿日期：2015-03-03；修回日期：2015-04-10。

备等）。备自投动作表是指当备自投条件表中的条件满足时，要触发的动作开关信息。

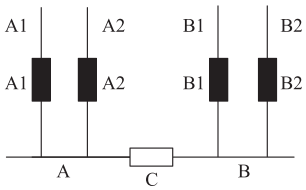
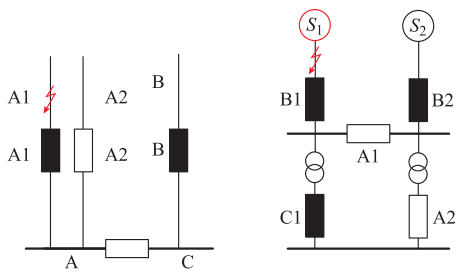


图 1　通用备自投模型
Fig.1　Common model of BATS

1.1　时序性

当电网发生故障后，可能造成许多母线停电，如果备自投之间不考虑动作时间的配合，就可能引起许多备自投动作，实际上，并非所有这些备自投动作都是必要的。因此，在备自投建模中必须考虑备自投的时序性。

如图 2 所示，图中分别给出了同一电压等级及不同电压等级的时序特性。图 2(a)中，备自投 A2 备 A1 的时序参数为 T，备自投 B 备 A1 的时序参数为 $T+\Delta T$，如果线路 A1 发生故障，则考虑时序性后只有备自投 A2 备 A1 会动作，而备自投 B 备 A1 不再满足动作条件。图 2(b)中，备自投 A1 备 B1 的时序参数为 T，备自投 A2 备 C1 的时序参数为 $T+\Delta T$，当 S_1 点发生故障时，只有备自投 A1 备 B1 会动作，备自投 A2 备 C1 不再满足动作条件，最终为开关 A1 闭合。



(a) 同一电压等级的时序性　(b) 不同电压等级的时序性

图 2　备自投时序性
Fig.2　Time characteristics of BATS

在备自投建模中，可以对满足动作条件的所有备自投按时序参数的大小进行排序，时序参数小的先动作，动作后再检查时序参数大的备自投是否满足动作条件，直到所有的备自投均检测完毕，最终得到所有满足条件的备自投。

1.2　均分性

备自投均分性是指当某备自投动作后，为避免备用电源过载而触发相关联的备自投从而使负荷在备用电源间分摊，这样使设备过载的可能性比单个备用电源带全部负荷有所降低。如图 3 所示，假设变压器 A 发生故障，如果考虑均分，最终结果为变压器 B 带母线 A 和 B1，变压器 C 带母线 B2 和 C，从而降低了变压器 B 过载的可能性。

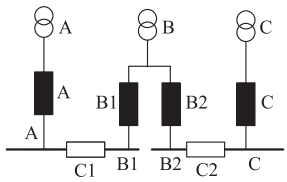


图 3　备自投均分性
Fig.3　Split characteristics of BATS

在建模中，如果设置了某个备自投考虑了均分，可以通过备自投对应的设备关系自动确定此备自投对应的均分备自投信息。图 3 中，假设备自投 C1 备 A 具有均分功能，因为备自投 C1 备 A 的备用母线为 B1，备自投 C2 备 B2 的工作母线为 B2，由于 B1 与 B2 为同一计算节点，所以可以最终确定备自投 C1 备 A 的均分备自投为 C2 备 B2。

1.3　方向性

备自投的方向性是指诸如母联备投在当前方式下只具备母联备母线 A 的功能，而母联备母线 B 的功能暂时被闭锁。在建模中，可以通过启动或闭锁功能来满足备自投的方向性。

1.4　区域备自投及广域备自投建模

国内一些地区电网中存在 110 kV 变电站串联供电的模式，针对此种接线方式在主站端配置了区域备自投系统，这要求基于 EMS 的备自投模型能对区域备自投进行建模，文献[8-13]分别从不同角度对区域备自投及广域备自投的应用及测试等方面进行了研究，本文前面给出的备自投建模方法可以满足要求，只是母线或开关属于不同的变电站，其动作条件可由用户根据需要设置。

1.5　充电条件及动作条件

针对图 1 的备自投通用模型，其充电条件和动作条件如表 1 所示，对于动作条件，用户也可根据实际情况进行更改。

表 1　备自投的充电条件及动作条件
Table 1　Charge condition and action condition of BATS

备自投	充电条件	动作条件
母联备投	母线 A 带电 &.&. 母线 B 带电 &.&. 开关 C 热备	母线 A 不带电 &.&. 开关 C 热备
设备备投	母线 A 带电 &.&. 母线 B 带电 &.&. 开关 C 热备	母线 A 不带电 &.&. 母线 B 不带电 &.&. 开关 C 合 &.&. (开关 B1 热备 ‖ 开关 B2 热备)

2　$N-1$ 与备自投的映射关系

对于地区电网来说，$N-1$ 故障的后果一般分为三种情况。

1）$N-1$ 故障引起解环的情况，这种情况为 $N-1$ 相应的设备本身在环路上运行，例如常规的 220 kV 线路或并列运行的线路。

2）$N-1$ 故障导致部分母线失电失压，这种情况通常为相应的故障所连的变电站为用户站，设备故障后会引起此用户站失电失压。

3）$N-1$ 故障引起备自投动作，例如常规的 110 kV 线路或主变等。

对于第 1 种情况，由于模拟故障后电网的计算节点不发生变化，可以使用补偿法进行计算。对第 2 种情况，故障后果通常为给出失负荷即可。本文主要对第 3 种情况进行重点分析。对于引起备自投动作的 $N-1$ 故障，由于涉及拓扑计算，文献[14-16]分别从不同的角度来缩短计算时间。本文的处理思路为：在基态拓扑的基础上进行局部拓扑或通过供电路径搜索得到满足动作条件的备自投，以确定 $N-1$ 故障与动作的备自投之间的映射关系，一般来说，对于第 3 种情况下的某个故障，总会有一个或多个备自投与之有映射关系。

2.1　基于局部拓扑关系建立映射关系

2.1.1　局部拓扑处理过程

一般来说，在 $N-1$ 分析前已经进行了基态的拓扑分析，由于对每个故障只相当于极少数的开关变位，可按局部拓扑来进行分析，即只需要对有开关变位的连接点重新修正相应的计算节点。具体处理步骤如下。

1）根据故障设备修正故障设备两端的计算节点与支路的连接关系。如图 2(a)所示，假设线路 A1 发生故障，只需修正线路 A1 两端的计算节点与支路的连接关系即可。

2）重新进行局部拓扑分析，确定满足动作条件的备自投，进一步根据备自投的开关状态进行局部拓扑分析，当开关开断时，确定可能出现的新的计算节点；当开关闭合时，修正原有的计算节点，例如在图 2(a)中，线路 A1 故障后引起备自投开关 B 备开关 A1 动作，开关 A1 断开时，会导致母线 A 所在的计算节点处出现新的计算节点，开关 C 闭合时会导致母线 A 及母线 C 的计算节点合并。

3）修正支路与计算节点的连接关系重新进行拓扑分析得到最终的电气岛。

2.1.2　建立映射关系

基于局部拓扑关系建立 $N-1$ 故障与动作的备自投映射关系的处理流程如图 4 所示。

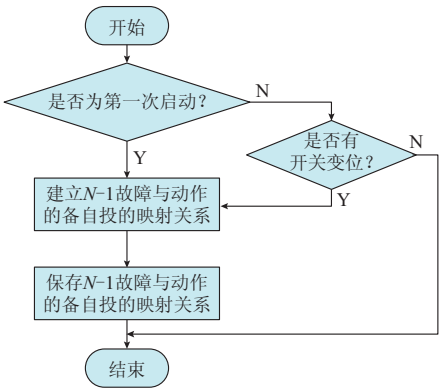


图 4　基于局部拓扑关系建立映射关系的处理流程
Fig.4　Process of building map of $N-1$ and BATS on local topology

从图 4 可以看出，只有在第 1 次启动服务或有开关变位时才需要重新建立 $N-1$ 故障与其触发的备自投的关系，在周期启动 $N-1$ 计算时可以直接使用此映射关系进行计算。

2.2　基于供电路径搜索的映射关系建立

通过局部拓扑能使处理时间显著缩短，但总的时间还是比较长，根据备自投的动作原理，在备自投满足充电条件的情况下，如果工作母线失电，而备用电源带电，则备自投就满足动作条件。因此，备自投的动作可以转换为工作电源及备用电源的供电路径搜索的问题，针对地区电网的特点，将 220 kV 主变及建模的发电机均作为电源点，从电源点向下搜索得到电压等级最低的供电母线，将满足条件的供电母线的供电路径记录下来。最终的判断依据如下。

1）如果某设备发生故障，而此设备对某些供电母线来说，属于通向电源点的唯一通路，则此设备故障必然导致工作母线失电，与此工作母线相关联的备自投也会动作。

2）如果某设备对某备自投来说是工作母线的电源，同时也是备用母线的电源，则此设备发生故障后相应的备自投不会动作。

对地区电网来说，备自投的电压等级一般包括 110 kV，35 kV 及 10 kV 等，220 kV 母线一般按环网运行，220 kV 线路故障一般不会导致备自投动作，相应的系统节点数保持不变，对此类设备的 $N-1$ 计算可按补偿法进行处理，或即使造成节点数的变化，也可另行判断，不会对本文的逻辑产生影响，所以在供电路径搜索时，从电源点（220 kV 母线节点及建模的发电机节点）作为根节点进行搜索。逻辑如下。

1）将 220 kV 线路开关模拟断开，建立计算节

点与支路的关系链表,对于双回线则只使用其中的一条,双回线中的任何一个设备故障不会引起备自投动作,可按补偿法计算。

2)从电源点(包括 220 kV 根节点及建模的发电机节点)采用深度优先搜索方法向下搜索,在搜索过程中若搜索到 35 kV 母线或 10 kV 母线,则记录相应供电路径,包括路径上的支路信息、母线信息等。

3)根据路径上的设备信息,记录出现在设备后的母线信息,根据备自投与母线的对应关系,建立设备与备自投的工作母线及设备与备自投的备用母线的映射关系。

4)如果对某个根节点在搜索结束前,新入栈的点已经出现在堆栈中,则表明存在环路信息,这种情况下环路上的设备信息发生故障不会引起备自投动作,只会造成解环。

5)如果一个设备既与工作母线有映射关系,又与备自投的备用母线有映射关系,则表明此设备对此备自投来说是同源的,此设备故障后不会触发此备自投动作。

6)在生成设备与备自投的映射关系时,同时记录有多少电源点与备自投有关系,即备自投有哪些电源点,如果某个设备与备自投之间有映射关系,同时对此设备而言,又有 n 个电源点,则表明 n 个电源点到此备自投之间都需要经过此设备,此设备即为关键的唯一供电路径,设备故障后必然会触发备自投动作。

图 5 给出了供电路径搜索的示意图,图中:S_1,S_2,S_3 分别为不同站的 220 kV 母线;S_4 为发电机;Tf_1,Tf_2,Tf_3 为 220 kV 变压器。通过图 5 可以确定设备与备自投的映射关系如表 2 所示。在表 2 中,母线 BS_1 为备自投 $BATS_1$ 的工作母线,BS_2 为备自投 $BATS_1$ 的备用母线。设备 Ln_1 与 $BATS_1$ 的工作母线 BS_1 之间有唯一的一条路径,相应的电源点为 S_1,表示为 $1(S_1)$,同时 $BATS_1$ 的工作母线 BS_1 对应的电源点总信息为 S_1,设备 Ln_1 与 $BATS_1$ 的备用母线 BS_2 之间没有映射关系,则表明设备 Ln_1 为 $BATS_1$ 的唯一供电路径,其故障会引起 $BATS_1$ 动作。设备 Tf_2 与 $BATS_2$ 的工作母线 BS_2 及备用母线 BS_3 都有映射关系,则设备 Tf_2 故障后不会引起 $BATS_2$ 动作。

从表 2 中还可以看出,设备 Tf_6 与 $BATS_3$ 之间有 2 条供电路径,其电源点为 S_2 和 S_4,表示为 $2(S_2,S_4)$,同时 $BATS_3$ 对应的电源信息有 2 个,所以设备 Tf_6 是唯一的供电路径,其故障后会引起 $BATS_3$ 动作。其他的对应关系均可通过映射表进行分析判断。

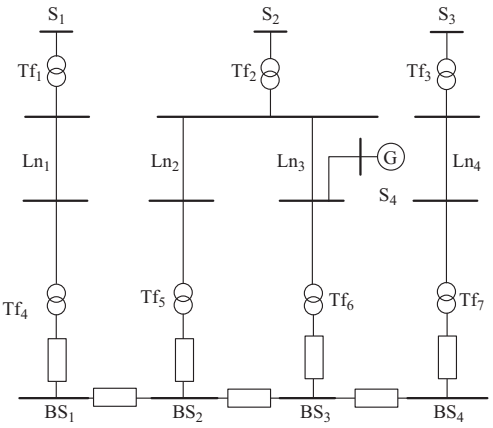


图 5　供电路径搜索示意图

Fig.5　Diagram of supply route searching

表 2　基于搜索的映射关系

Table 2　Relation of map on searching

备自投	母线	Ln_1	Ln_2	Tf_2	Tf_6	Ln_4	电源点信息
$BATS_1$	BS_1	$1(S_1)$					S_1
	BS_2		$1(S_2)$				S_2
$BATS_2$	BS_2			$1(S_2)$			S_2
	BS_3			$1(S_2)$	$2(S_2,S_4)$		S_2
$BATS_3$	BS_3			$1(S_2)$	$2(S_2,S_4)$		S_2,S_4
	BS_4					S_5	S_5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮			⋮
$BATS_n$	BS_{n-1}						S_{m-1}
	BS_{n-2}						S_m

2.3　映射关系的合理性和有效性验证

以图 5 为例,假设线路 Ln_1 发生故障,通过局部拓扑分析得出的结果是变压器 Tf_4 及母线 BS_1 均不带电,$BATS_1$ 满足动作条件,从表 2 中也可以得到 Ln_1 故障会引起 $BATS_1$ 动作的结果,如果按预先建立 $N-1$ 故障与动作的备自投的映射关系进行处理,则在 $N-1$ 分析前先通过局部拓扑建立故障设备与动作的备自投的映射关系,映射关系只在有开关变位时才需重新形成。

图 5 中,对于其他故障引起的动作的备自投的关系与局部拓扑的分析结果一致的,从而证明本文提出的两种映射关系的建立方法是合理并有效的。

3　负荷转移处理

文献[17]在处理负荷转移时需要考虑开关的状态变化,这里不必考虑开关的变化,只需要使用基态的拓扑关系即可。对建立好映射关系的 $N-1$ 故障可按关联的备自投的属性不同采取不同的转移方法。

3.1　常规母联备投及设备备投

常规的母联备投及设备备投负荷转移为将工作

母线的负荷清零，而在备用母线处在原有负荷的基础上叠加工作母线的原始负荷。

3.2　多备一模式

如图 1 所示，假设是二备二的模式，则在转移时将总的需要转移的负荷在备用电源 B1 和 B2 之间分摊，各承担一半。

3.3　均分性

如图 3 所示，均分备自投的负荷转移处理为将工作母线 A 的负荷清零，而将母线 B1 的负荷在原来基础上叠加工作母线 A 的负荷值，将母线 B2 的负荷清零，而将母线 C 的负荷在原来基础上叠加工作母线 B2 的负荷值。

3.4　广域备投

广域备自投负荷转移方法与普通的设备备投一致，只是其工作母线与备用母线不属于同一个变电站。

4　$N-1$ 校核

在建立好 $N-1$ 故障与动作的备自投的映射关系后，同时将负荷进行合理转移，接下来需要对负荷转移后的网络进行校核，如式(1)和式(2)所示，假设节点 i 与节点 j 之间有一个备自投且某个故障会引起此备自投动作，其中节点 i 为备自投的工作母线，节点 j 为备自投的备用母线，工作母线所带的有功负荷为 P_l，无功负荷为 Q_l，在计算时使用 PQ 快速分解法，并使用当前启动处理，不用重新形成导纳阵及因子表，只需要在节点 i 将需要转移的负荷(P_l，Q_l)去掉，而在节点 j 增加需要转移的负荷量(P_l，Q_l)，然后进行潮流迭代即可。

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\Delta P_1}{V_1} \\ \vdots \\ \dfrac{\Delta P_i - P_l}{V_i} \\ \dfrac{\Delta P_j + P_l}{V_j} \\ \vdots \\ \dfrac{\Delta P_m}{V_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1i} & B_{1j} & \cdots & B_{1m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{i1} & \cdots & B_{ii} & B_{ij} & \cdots & B_{im} \\ B_{j1} & \cdots & B_{ji} & B_{jj} & \cdots & B_{jm} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{m1} & \cdots & B_{mi} & B_{mj} & \cdots & B_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \vdots \\ \Delta\delta_i \\ \Delta\delta_j \\ \vdots \\ \Delta\delta_m \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\Delta Q_1}{V_1} \\ \vdots \\ \dfrac{\Delta Q_i - Q_l}{V_i} \\ \dfrac{\Delta Q_j + Q_l}{V_j} \\ \vdots \\ \dfrac{\Delta Q_m}{V_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1i} & B_{1j} & \cdots & B_{1m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{i1} & \cdots & B_{ii} & B_{ij} & \cdots & B_{im} \\ B_{j1} & \cdots & B_{ji} & B_{jj} & \cdots & B_{jm} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{m1} & \cdots & B_{mi} & B_{mj} & \cdots & B_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_i \\ \Delta U_j \\ \vdots \\ \Delta U_m \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：ΔP_i，ΔQ_i，V_i，$\Delta\delta_i$，ΔU_i 分别为节点 i 的有功增量、无功增量电压、相角差、电压幅值差；B_{ij} 和 B_{jj} 分别为节点 i，j 的互电纳和节点 j 的自电纳。

对于引起多个备自投动作的故障，需要有多个节点进行负荷转移，在上述公式中对相应的行进行处理即可。

5　总体流程

计及备自投的 $N-1$ 静态安全分析快速计算方法的总体流程图如图 6 所示，图中 N 为故障总数，i 为当前故障。

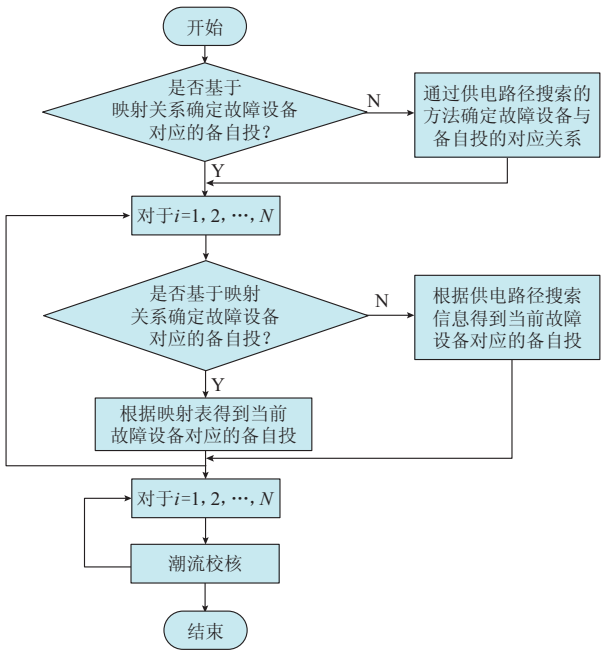


图 6　$N-1$ 总体流程图
Fig.6　Flow chart of $N-1$

从图中可以看出，用户可以根据需要选择使用基于映射的扫描方法或基于供电路径搜索的处理方法，一般来说，在实时态模式中可优先考虑使用基于映射的扫描方法，而在研究态中，由于用户随时会对运行状态进行改变，使用基于供电路径搜索的方法更合适。

经过扫描后进行潮流校核处理，在潮流校核时都是使用基于负荷转移的方法进行计算。

6　性能比较

在操作系统为 Linux Red Hat 4.1.2-14，内存为 2 GB，CPU 为 2.93 GHz 上测试结果如下：以广东某大型电网为例，系统规模为计算节点 2 633 个，支路总数 3 046 条（其中连接点数为 38 570 个，开关为 38 260 个，发电机为 832 个，负荷为 6 766 个，线路数为 1 768 个，两卷变压器为 636 个，三卷变压器为 214 个，物理母线为 1 596 个，备自投 924 个），$N-1$ 故障总数为 2 618 个，其中能引起备自投动作的故障数为 1 079 个（包括 220 kV 主变、110 kV 线路及 110 kV 主变，不包括 220 kV 线路，对多 T 结线的线路组按一个故障处理）。

表 3　计算时间比较

Table 3　Comparison of calculating time

算法	平均一个故障处理时间/s	$N-1$ 总时间/s
基于局部拓扑的 $N-1$ 扫描方法	0.108	116.5
基于供电路径搜索的 $N-1$ 扫描方法	0.041	44.5
基于映射的 $N-1$ 扫描方法	0.038	41.0

表 3 是不同方法的计算时间对比。从表 3 可以看出，基于负荷转移的 $N-1$ 扫描方法（包括按供电路径搜索及基于映射的方法）比基于局部拓扑的 $N-1$ 扫描方法的时间减少了 72 s（其中单次拓扑时间为 0.035 s，供电路径搜索为 3.5 s，单次潮流校核为 0.038 s）。

7　结语

本文在充分考虑了地区电网网架特点的基础上，针对地区电网的特点提出在实时 $N-1$ 扫描中考虑备自投的处理方法，该方法不是通过开关的分合操作来模拟备自投的动作，而是通过将负荷从原始工作母线转移到备用母线的方法来模拟备自投的动作，由于不改变电网的基本拓扑结构，从而大大缩短了计算时间。现场数据计算表明，该方法具有一定的通用性，在地区电网的 $N-1$ 校核处理中具有一定的推广价值。

参 考 文 献

[1] 吴际舜.电力系统静态安全分析[M].上海：上海交通大学出版社，1985.

[2] 张海峰.电网实时静态安全分析系统的研究[J].中国电业，2011，21(11)：12-15.
ZHANG Haifeng. Research on the real time static security analysis system of power grid[J]. China Electric Power, 2011, 21(11): 12-15.

[3] 吴文传，孙宏斌，张伯明，等.新一代 EMS/DTS 一体化系统中基于自定义建模的自动装置模拟[J].电力系统自动化，2000，24(4)：57-60.
WU Wenchuan, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Simulation of automatic device based on user-defined model in integrated EMS/DTS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 57-60.

[4] 张志坚，乔振宁，王建东，等.预想事故排序算法比较[J].电力自动化设备，2001，21(11)：25-27.
ZHANG Zhijian, QIAO Zhenyu, WANG Jiandong, et al. Comparison of contingency ranking algorithms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 25-27.

[5] 吴桢，丁晓群，杨佳，等.电力系统在线偶然事故排序的一种新方法[J].江苏电机工程，2005，24(6)：8-10.
WU Zhen, DING Xiaoqun, YANG Jia, et al. A new measure of contingency ranking on-line combined with reliability [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24(6): 8-10.

[6] 袁志强，陈宇晨，刘涌，等.改进直流法在静态安全分析中的应用[J].继电器，2003，31(7)：23-26.
YUAN Zhiqiang, CHEN Yuchen, LIU Yong, et al. Application of the improved direct current load flow algorithm on static security analysis[J]. Relay, 2003, 31(7): 23-26.

[7] 陈勇，姚玉斌，夏翔，等.考虑备自投的地区电网静态安全分析设计与应用[J].电力系统自动化，2004，28(19)：84-87.
CHEN Yong, YAO Yubin, XIA Xiang, et al. Design and application of static security analysis considering BATS for a district power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 84-87.

[8] 潘凯岩，黄红远，车磊.区域备自投通用模型建模及其策略实现[J].南方电网技术，2011，33(22)：94-97.
PAN Kaiyan, HUANG Hongyuan, CHE Lei. General model building and implementation logic for regional BATS [J]. Southern Power System Technology, 2011, 33(22): 94-97.

[9] 周伊林，孙建伟，陈炯聪.区域网络备自投系统及其测试关键技术[J].电力系统自动化，2012，36(23)：109-113.
ZHOU Yilin, SUN Jianwei, CHEN Jiongcong. Spare power automatic switchover for area network and its key test technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 109-113.

[10] 施雄华，郭云川，金震，等.适用于串行供电网络的区域备用电源自动投入系统[J].电力系统自动化，2013，37(23)：88-92.
SHI Xionghua, GUO Yunchuan, JIN Zhen, et al. A regional

automatic switchover system for serial power supply network [J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(23)：88-92.

[11] 杨浚文，吴文传，孙宏斌，等.一种基于EMS的广域备自投控制系统[J].电力系统自动化，2010，34(11)：61-66.
YANG Junwen，WU Wenchuan，SUN Hongbin，et al. A wide-area automatic switchover system based on EMS [J]. Automation of Electric Power Systems，2010，34(11)：61-66.

[12] 徐希，韩韬，杜红卫，等.主站集中式广域备用电源自动投入系统[J].电力系统自动化，2010，34(21)：112-115.
XU Xi，HAN Tao，DU Hongwei，et al. A main station based centralized wide area automatic switchover system [J]. Automation of Electric Power Systems，2010，34(21)：112-115.

[13] 邹德虎，王仲达，徐柳飞，等.网络备自投系统在地调EMS中的应用[J].电力系统自动化，2013，37(17)：106-111.
ZOU Dehu，WANG Zhongda，XU Liufei，et al. Application of a power network automatic switchover in the EMS of regional dispatch center [J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(17)：106-111.

[14] 王腊梅，刘文颖，张志新，等.静态安全分析中基于支路模型的拓扑分析[J].电力科学与工程，2010，26(9)：12-16.
WANG Lamei，LIU Wenying，ZHANG Zhixin，et al. Topology analysis in security analysis based on branch analog method[J]. Electric Power Science and Engineering，2010，26(9)：12-16.

[15] 丁平，李亚楼，徐得超，等.电力系统快速静态安全分析的改进方法[J].中国电机工程学报，2010，30(31)：77-80.
DING Ping，LI Yalou，XU Dechao，et al. Improved algorithm of fast static state security analysis of power systems [J]. Proceedings of the CSEE，2010，30(31)：77-80.

[16] 汤必强，李峰，於益军，等.计及自动装置模拟的大电网在线静态安全分析[J].电力系统自动化，2011，35(14)：107-111.
TANG Biqiang，LI Feng，YU Yijun，et al. Online static security analysis considering automatic device simulation for large power system [J]. Automation of Electric Power Systems，2011，35(14)：107-111.

[17] 潘凯岩，刘仲尧.负荷转供在线辅助决策系统在大型电网中的应用[J].电气技术，2013，33(17)：54-57.
PAN Kaiyan，LIU Zhongyao. Application of on-lined load-transfer aided decision system in large power grid[J]. Electrical Engineering，2013，33(17)：54-57.

潘凯岩(1973—)，男，通信作者，硕士，高级工程师，架构师，主要研究方向：能量管理系统软件。E-mail：kaiyanpan@126.com

谭大帅(1987—)，男，主要研究方向：能量管理系统软件。

赵　勇(1971—)，男，硕士，高级工程师，主要研究方向：能量管理系统。

（编辑　孔丽蓓）

A Fast Computing Method of $N-1$ in Static Safety Analysis Considering BATS in Regional Power Grid

PAN Kaiyan[1]，*TAN Dashuai*[1]，*ZHAO Yong*[1]，*LI Junge*[2]，*GAO Qiang*[2]

(1. Dongfang Electronics Corporation，Yantai 264000，China；
2. Guangzhou Power Supply Bureau，Guangzhou 510620，China)

Abstract: Many busbar automatic transfer switches (BATSs) will be triggered by $N-1$ analysis because of their own characteristics of a regional power grid. In the traditional method，a specific failure is simulated first，then the topology analysis is made and finally the topology analysis considering BATS operation is made. The whole process involves frequent switch operation，so a great deal of topology calculation is needed. Two real-time $N-1$ calculation methods considering BATS are proposed based on the characteristics of the regional power grid. In these methods，BATS operation is simulated by the load transfer method in the flow check process by means of power supply path search or pre-building the mapping relation between $N-1$ fault and actuating BATS. As the method does not have to change the topology information of the power grid，it can significantly reduce calculating time. Field operation shows that the proposed method is feasible and better able to perform $N-1$ analysis for the power grid.

Key words: static safety analysis；$N-1$；load transformation；busbar automatic transfer switch (BATS)；power supply path search