

基于联络关系的主变故障负荷转供方案

马静, 马伟, 王增平

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 针对主变故障后负荷转供过程中联络线路容量不足、主变过载等问题, 提出了一种基于联络关系的主变故障负荷转供方案。该方案在配电网正常运行情况下, 利用简化的网络拓扑关系形成主变联络关系矩阵及负荷转移区域, 当主变因故障或检修退出运行时, 基于负荷转移小区容载比对故障主变负荷进行“按需分配”。在分配的过程中, 充分计及了联络线路及主变容量约束条件, 分别设计了次级负荷转供策略及二次转供策略。算例结果表明, 该方案有效地提高了配电网设备利用率和负荷转供能力, 同时, 使负荷转供后配电网中的负荷分布更加均衡。

关键词: 负荷转移能力; 供电恢复; 主变故障; 容载比; 设备利用率

Power restoration scheme for main transformer fault based on the interconnection relationship

MA Jing, MA Wei, WANG Zeng-ping

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: In order to solve the problems such as insufficient interconnection capacity, overload of main transformer and so forth during the power supply recovering process after main transformer fault, this paper presents a novel power restoration scheme based on interconnection relationship capability. This scheme firstly forms main transformer interconnection matrix and conforms load transfer area by using simplified network topology relationship. When the main transformer is out of operation due to failure or maintenance, the load of faulted main transformer is distributed basing on the capacity-load ratio of the load transfer district. In the process of distribution, sub-load transfer strategy is proposed aiming at the constraint of interconnection capacity and secondary transfer strategy aiming at the constraint of main transformer capacity. Simulation results verify that the scheme can effectively improve the equipment utilization ratio of distribution network and load transfer capability, besides, the load distribution is more balanced.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215200), National Natural Science Foundation of China (No. 51277193), the Chinese Universities Scientific Fund Project (No. 2014ZZD02), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of State Education Ministry ([2011] No. 1139), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2012502034), Beijing Metropolis Beijing Nova Program (No. Z141101001814012), the Excellent Talents in Beijing City (No. 2013B009005000001), and the Fund of Fok Ying Tung Education Foundation (No. 141057).

Key words: load transfer capability; power restoration; main transformer fault; capacity-load ratio; equipment utilization ratio

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0001-07

0 引言

当主变发生故障或需要检修时, 若不考虑配电

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2012CB215200); 国家自然科学基金项目(51277193); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014ZZD02); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2011] 1139号); 河北自然科学基金项目(E2012502034); 北京市科技新星支持计划(Z141101001814012); 北京市优秀人才支持计划(2013B009005000001); 霍英东教育基金(141057)

网在站间的负荷转供, 则主变 $N-1$ 的安全问题将退化为站内主变间负荷转移的简单问题, 这种“各自为站”的运行方式既限制了配电网的供电能力, 也违背了配电设备利用率最大的要求^[1-3]。近年来, 随着大规模配电网的建设和改造以及大范围配电网联络的加强, 供电恢复的路径与方式的选择日益灵活^[4-8]。与此同时, 变电站综合自动化技术^[9-10]的快速发展与应用也为站间主变迅速、灵活地负荷转供提供了有利的条件^[10-13]。

目前, 计及 $N-1$ 安全准则的负荷转供方法主要包括: 负荷法^[14-15]、主变互联转供法^[16-18]、综合转移矩阵法^[19]等。负荷法提出把主变间联络馈线作为负荷转供途径, 形成站间负荷转移的思想雏形, 但计算过程较为繁琐。主变互联转供法将故障主变的负荷平均分配给与其存在联络关系的主变, 转供思路清晰, 计算量小, 但存在负荷转移路径通畅和设备容量充足的假定, 并未计及网络结构和设备容量的约束^[16]。在此基础上, 综合转移矩阵法考虑主变和联络线路容量的约束, 研究了与故障主变同站的过载主变二次转供问题, 更贴近实际配电系统运行状况, 但由于未考虑主变容载比, 转供后可能出现部分主变负载率偏高, 部分主变负载率偏低的情况。

针对上述问题, 本文提出一种基于联络关系的主变故障负荷转供方案。该方案在配电网正常运行情况下, 利用简化的网络拓扑关系形成主变联络关系矩阵及负荷转移区域, 当主变因故障或检修退出运行时, 基于负荷转移小区容载比对故障主变负荷进行“按需分配”。在分配的过程中, 充分计及了联络线路及主变容量约束条件, 分别设计了次级负荷转供策略及二次转供策略。算例结果表明: 该方案在提高配电网设备利用率和负荷转供能力的同时, 使转供后配电网中负荷分布也更加均衡。

1 主变联络关系

在满足电网 $N-1$ 条件下, 某台主变所带负荷可通过联络线和联络开关动作转移至另外一台主变, 就定义这两台主变之间存在联络关系^[16]。

设某配电系统内共有 n 座变电站, 分别编号为 $1, 2, \dots, n$, 与其对应的各座变电站的主变台数分别为 N_1, N_2, \dots, N_n 。将第 x 座变电站的第 j 号主变编号为 $\sum_{i=1}^{x-1} N_x + j$, 则该配电系统的主变总台数为 $N = \sum_{i=1}^n N_i$ 。定义该区域主变关联矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,j} & \cdots & a_{1,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i,1} & \cdots & a_{i,j} & \cdots & a_{i,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{N,1} & \cdots & a_{N,j} & \cdots & a_{N,N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: 若 $a_{ij}=1$, 表示主变 i 和 j 之间存在联络关系; 若 $a_{ij}=0$, 表示主变 i 和 j 之间不存在联络关系, 即主变 i 故障或检修时, 主变 j 无法直接转供主变 i 的负荷。

2 负荷转移方案

2.1 负荷转移区域

在供电区域中, 设某台主变为中心主变, 与其存在联络关系的主变定义为直连主变, 与直连主变存在联络关系的下级主变定义为次连主变。当中心主变故障或者检修时, 为满足不中断供电的原则, 需要对中心主变上的负荷进行转移。

负荷转移区域指由中心主变的所有直连主变和次连主变构成的区域。在负荷转移区域中, 每个直连主变和与其存在联络关系的次连主变构成一个负荷转移小区。配电网中每台主变均可离线形成以自身为中心主变的负荷转移区域, 一旦确定故障或者检修主变, 可迅速得到负荷转移区域。

2.2 负荷转移策略

假设在 x 号变电站中, 主变 i (即 $i \in x$) 因故障或检修退出运行时, 定义以主变 i 为中心主变的负荷转移区域为 C^i 。

$$C^i = \{C_1, \dots, C_j, \dots, C_N\} \quad (2)$$

其中, C_j 表示主变 i 的第 j 号负荷转移小区。若主变 j 不属于主变 i 的直连主变, 即 $a_{ij}=0$ 时, $C_j=0$; 同时, 主变 i 自身不构成负荷转移小区, 即 $C_i=0$ 。

对于主变 i 所在母线上的直接挂接负荷 (如放射状馈线负荷), 仅通过站内主变进行转供^[8]。定义负荷转移小区 C_j 的容载比 Q_j 为

$$Q_j = \begin{cases} q_j, & a_{i,j}=1 \\ 0, & a_{i,j}=0 \text{ 或 } j=i \end{cases} \quad (3)$$

式中, q_j 定义如式(4)所示。

$$q_j = \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^N R_k a_{j,k} - R_i}{\sum_{k=1}^N F_k a_{j,k} - F_i}, & j \notin x \\ \frac{\sum_{k=1}^N R_k a_{j,k} - R_i}{\sum_{k=1}^N F_k a_{j,k} + F_{Bi} - F_i}, & j \in x \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_k 、 F_k 分别表示主变 k 的额定容量和负荷; F_{Bi} 为主变 i 所在母线上的直接挂接负荷; $j \in x$ 表示主变 j 属于 x 号变电站。

为使配电区域中的负荷分布更均衡, 除母线直接挂接负荷外, 对其他馈线负荷按照负荷转移小区的容载比进行“按需分配”, 即容载比大的负荷转移小区多转供, 容载比小的负荷转移小区少转供。定

义负荷转移小区 j 转供的负荷量 $P_{j,T1}$ 为

$$P_{j,T1} = (F_i - F_{Bi}) \times \frac{Q_j}{\sum_{k=1}^N Q_k} \quad (5)$$

式中: F_i 表示主变 i 的负荷; F_{Bi} 为主变 i 所在母线上的直接挂接负荷; Q_j 表示负荷转移小区 j 的容载比。

利用式(5), 形成初级负荷转移矩阵 \mathbf{P}^{T1} 为

$$\mathbf{P}^{T1} = [P_{1,T1}, \dots, P_{j,T1}, \dots, P_{N,T1}] \quad (6)$$

3 约束条件

3.1 联络线路容量约束

对站内联络来说, 假定联络线路存在且容量足够大, 支持主变负荷与同一站内其他主变的转移是畅通且可均分的^[20]。对站间联络来说, 每条联络线路都有容量限制, 因此主变间的负荷转移量受联络线路型号和数量的限制, 即负荷转移量不能超过主变间的最大联络容量。针对联络线路容量约束的问题, 本文提出以联络线路容量进行功率传输的次级负荷转供策略。定义联络线路容量矩阵 \mathbf{S} 为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{1,1} & \dots & s_{1,j} & \dots & s_{1,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ s_{i,1} & \dots & s_{i,j} & \dots & s_{i,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ s_{N,1} & \dots & s_{N,j} & \dots & s_{N,N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, s_{ij} 表示主变 i 和 j 之间的最大联络线路容量。若两台主变之间不存在联络关系, 即 $a_{ij}=0$ 时, $s_{ij}=0$; 同时, 主变自身联络线路容量 $s_{ii}=0$ 。

定义联络线路容量约束判断矩阵 \mathbf{L} 为

$$\mathbf{L} = \max\{\mathbf{P}^{T1} - \mathbf{S}^i, 0\} \quad (8)$$

式中: \mathbf{S}^i 为联络线路容量矩阵 \mathbf{S} 的第 i 行; \mathbf{P}^{T1} 为初级负荷转移矩阵。当 $L_j=0$ 时, 表明主变 i 和 j 之间的联络线路容量满足负荷转移要求, 可按照初级负荷转移容量 $P_{j,T1}$ 进行转供; 当 $L_j>0$ 时, 表明主变 i 和 j 之间的联络线路容量不满足负荷转移要求。此时, 该负荷转移小区的负荷转移量取联络线路容量 s_{ij} , 即 $P_{j,T1} = s_{ij}$ 。为避免切除负荷, 对满足联络线路容量约束的负荷转移小区的负荷转移量进行调整, 修正式(5)为

$$P_{g,T2} = (F_i - F_{Bi} - \sum_{k_1=1}^p s_{i,k_1}) \times \frac{Q_g}{\sum_{k_2=1}^N Q_{k_2} - \sum_{k_1=1}^p Q_{k_1}} \quad (9)$$

式中, p 表示矩阵 \mathbf{L} 中非 0 元素的数目。

计及联络线路容量约束, 形成次级负荷转移矩阵 \mathbf{P}^{T2} 为

$$\mathbf{P}^{T2} = [P_{1,T2}, \dots, s_{i,j}, \dots, P_{g,T2}, \dots, P_{N,T2}] \quad (10)$$

当主变 i 故障或检修时, 因联络线路容量约束需切除的负荷量为 ΔF_i :

$$\Delta F_i = F_i - F_{Bi} - \text{sum}(\mathbf{P}^{T2}) \quad (11)$$

式中, sum 表示对矩阵 \mathbf{P}^{T2} 中元素求和。其中, 当 $\Delta F_i = 0$ 时, 表示故障主变 i 的负荷可全部转供; 当 $\Delta F_i > 0$ 时, 表示由于联络线路容量的约束, 故障主变 i 的负荷不能全部转供, 此时需要运行人员根据实际情况对重要负荷优先转供。

3.2 主变容量约束

在主变 i 故障或检修之前, 若部分直连主变负载率较高, 当其转供故障主变 i 的负荷后可能出现过载情况, 此时就有必要对该类直连主变的部分负荷进行二次转供, 即通过次连主变进行转供。

定义主变过载容量矩阵 \mathbf{U} 为

$$\mathbf{U} = [u_1 \quad \dots \quad u_j \quad \dots \quad u_n] \quad (12)$$

故障主变 i 所在母线直接挂接负荷 F_{Bi} 由站内非故障主变平均分配转供, 元素 u_j 计算公式如式(13)所示。

$$u_j = \begin{cases} P_{j,T2} + F_j - R_j + \frac{F_{Bi}}{N_x - 1}, & j \in x \text{ 且 } j \neq i \\ 0, & j = i \\ P_{j,T2} + F_j - R_j, & j \notin x \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{j,T2}$ 表示次级负荷转移矩阵 \mathbf{P}^{T2} 中的第 j 个元素; R_j 、 F_j 分别表示主变 j 的额定容量和负荷; F_{Bi} 为故障主变 i 所在母线上的直接挂接负荷; N_x 表示 x 号变电站的主变台数。

定义主变容量约束判断矩阵 \mathbf{T} 为

$$\mathbf{T} = \max\{\mathbf{U}, 0\} \quad (14)$$

式中: 若 $T_j=0$, 表示主变 j 满足主变容量约束, 无需二次转供; 若 $T_j>0$, 表示主变 j 转供负荷后过载, 需二次转供。

对于过载主变 j , 二次转供时优先考虑站内转供, 站内转供失败时由站内主变和站间主变共同转供。定义主变 j 的二次转供方案选择逻辑 Y_j 为

$$Y_j = \begin{cases} \max \left\{ \sum_{k_1=k_3+1}^{k_3+N_x} (F_{k_1} + P_{k_1,T2} - R_{k_1}) - F_i + R_i + F_{Bi}, 0 \right\}, j \in x \\ \max \left\{ \sum_{k_1=k_2+1}^{k_2+N_y} (F_{k_1} + P_{k_1,T2} - R_{k_1}), 0 \right\}, j \in y \text{ 且 } y \neq x \end{cases} \quad (15)$$

式中： $k_2 = \sum_1^{y-1} N_{y-1}$ ， $k_3 = \sum_1^{x-1} N_{x-1}$ ； N_x 、 N_y 分别表示 x 号和 y 号变电站的主变台数。其中，当 $Y_j=0$ 时，表明站内转供成功，执行方案 1；当 $Y_j>0$ 时，表明站内转供失败，执行方案 2，进行站间转供。

方案 1：站内主变转供

对过载主变 j 所在变电站中主变负荷进行平均分配，定义二次转供后主变 j 需要承担的负荷 F_j^{new} 为

$$F_j^{\text{new}} = \begin{cases} \frac{\sum_{k_1=k_2+1}^{k_3+N_x} (F_{k_1} + P_{k_1,T2}) - F_i + F_{Bi}}{N_x - 1}, j \in x \\ \frac{\sum_{k_1=k_2+1}^{k_2+N_y} (F_{k_1} + P_{k_1,T2})}{N_y}, j \in y \text{ 且 } y \neq x \end{cases} \quad (16)$$

方案 2：站间主变转供

以过载主变 j 为中心主变，重新划分负荷转移区域(不包括故障主变 i)，对过载负荷量 T_j 进行二次转供，计算方法同故障主变 i 。

一般情况下 T_j 远小于 F_i ，因此，二次转供时通常可通过站内主变转供成功。

4 负荷转移步骤

正常运行情况下，利用简化的网络拓扑关系形成主变联络关系矩阵及负荷转移区域，当主变因故障或检修退出运行时，基于负荷转移小区容载比对故障主变负荷进行“按需分配”。在分配的过程中，针对联络线路及主变容量约束条件，分别执行次级负荷转供策略及二次转供策略。

具体转供步骤如下。

步骤 1：简化配电网络拓扑关系，形成主变关联矩阵。

步骤 2：确定中心主变，划分负荷转移区域，形成负荷转移小区。

步骤 3：计算负荷转移小区容载比，形成初级负荷转移矩阵。

步骤 4：判断初级负荷转移矩阵是否满足联络线路容量约束。若满足约束，按照初级负荷转移矩阵进行转供；若不满足约束，形成次级负荷转供策略。

步骤 5：判断直连主变是否过载。若主变不过载，负荷转移过程结束；若主变过载，二次转供优先进行站内转供，当站内转供失败时通过站间转供。负荷转供过程流程图如图 1 所示。

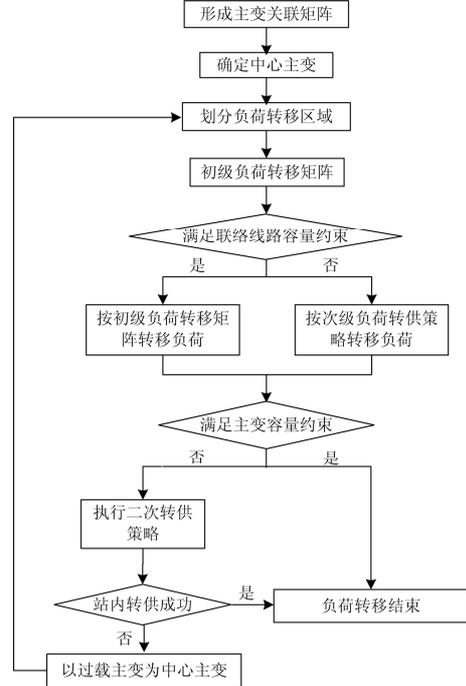


图 1 负荷转供流程图

Fig. 1 Flow chart of load transfer

5 算例

5.1 算例概述

在 IEEE 配电网算例^[21-22]的基础上形成现状网数据，该配电系统站间联络电气接线图如图 2 所示，电气参数在表 1 和表 2 中给出。

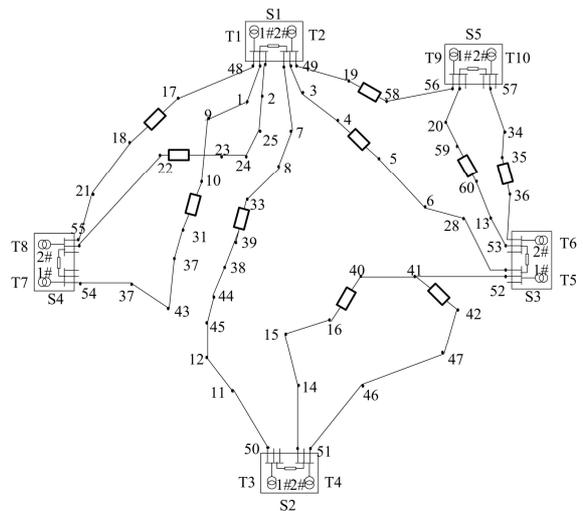


图 2 主变互联配电网算例

Fig. 2 Sample of interconnections among main transformers

表 1 变电站数据
Table1 Substation data

变电站编号	主变	主变电压 比/(kV/kV)	主变容量 /MVA	主变负荷 /MW
S1	1#	110/10	31.5	19.7
	2#	110/10	31.5	24.2
S2	1#	35/10	31.5	19.5
	2#	35/10	31.5	20.1
S3	1#	35/10	40	26.2
	2#	35/10	40	24.3
S4	1#	110/10	31.5	16.3
	2#	110/10	31.5	16.3
S5	1#	110/10	31.5	21.3
	2#	110/10	31.5	19.7

表 2 联络支路数据
Table 2 Tie line data

联络支路	线路型号	容量/MVA
(15,16)		
(38,39)	JKLV-35	2.06
(42,47)		
(31,37)	JKLYJ-70	4.43
(23,24)		
(34,35)	JKLYJ-120	7.64
(59,60)		
(5,6)		
(34,35)	JKLYJ-150	8.83
(19,58)		
其他	JKLYJ-185	11.3

5.2 算例求解

主变关联矩阵 A 和联络线路容量矩阵 S 分别为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 31.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.43 & 18.94 & 0 & 0 \\ 31.5 & 0 & 2.06 & 0 & 8.83 & 0 & 0 & 0 & 8.83 & 0 \\ 0 & 2.06 & 0 & 31.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 31.5 & 0 & 4.12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8.83 & 0 & 4.12 & 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 7.64 & 8.83 \\ 4.43 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 31.5 & 0 \\ 18.94 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 31.5 & 0 & 0 \\ 0 & 8.83 & 0 & 0 & 0 & 7.64 & 0 & 0 & 0 & 31.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8.83 & 0 & 0 & 31.5 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

以主变 T5 停电检修为例, 验证负荷转供方案的可行性。以主变 T5 为中心主变的负荷转移区域 C^5 为

$$C^5 = [0 \ C_2 \ 0 \ C_4 \ 0 \ C_6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (19)$$

主变 T5 所在母线的直接挂接负荷 $F_{B5} = 2 \text{ MW}$, 依式(3)、式(4)计算各个负荷转移小区的容载比, 结果如表 3 所示。

表 3 负荷转移小区的容载比
Table 3 Capacity load ratio of the load transfer cell

负荷转移小区	C_2				C_4		C_6		
主变编号	1	2	3	9	3	4	6	9	10
区域容载比 Q_i	1.4841				1.5909		1.5305		

初级负荷转移矩阵 P^{T1} 为

$$P^{T1} = [0 \ 7.80 \ 0 \ 8.36 \ 0 \ 8.04 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (20)$$

依式(8)可得, 联络线路容量约束判断矩阵 L 为

$$L = [0 \ 0 \ 0 \ 4.24 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (21)$$

计算结果表明, 主变 T4-T5 间联络线路不满足容量约束, 利用式(9)形成次级负荷转移矩阵 P^{T2} 为

$$P^{T2} = [0 \ 10.23 \ 0 \ 4.12 \ 0 \ 9.85 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (22)$$

依式(11)可得, 因联络线路容量约束, 需要切除主变 T5 的负荷 ΔF_5 为

$$\Delta F_5 = F_5 - F_{B5} - \text{sum}(P^{T2}) = 0 \text{ MW} \quad (23)$$

计算结果表明, 主变 T5 的负荷能够通过联络线路, 由负荷转移区域中其他主变转带。

计及主变容量约束后, 判断矩阵 T 为

$$T = [0 \ 2.93 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (24)$$

由于 $T_2 > 0$, 表示主变 T2 不满足主变容量约束, 需二次转供。

如图 2 所示, 主变 T2 和故障主变 T5 不属于同一变电站, 依据式(15)得主变 T2 的二次转供方案选择逻辑 Y_2 为

$$Y_2 = \max \left\{ \sum_{k_1=1}^2 (F_{k_1} + P_{k_1, T2} - R_{k_1}), 0 \right\} = \max \{ (19.7 + 24.2 + 0 + 10.23 - 31.5 - 31.5), 0 \} = 0 \quad (25)$$

计算结果表明, 主变 T2 二次转供时可通过站内转供, 因此执行方案 1。

依据式(16), 二次转供后主变 T2 的负荷 F_2^{new} 为

$$F_2^{\text{new}} = \frac{\sum_{k_1=k_2+1}^{k_2+N_1} (F_{k_1} + P_{k_1, T2})}{N_1} = \frac{19.7 + 24.2 + 10.23}{2} = 27.06 \text{ MW} \quad (26)$$

至此, 整个负荷转移过程结束, 本方案对失电负荷全部恢复供电。主变 T2、T4、T6 的负载率分别为: 0.86、0.77、0.90。

5.3 算例对比

利用文献[16]的方法, 主变T5故障时需要切除负荷5.98 MW。负荷转供结束后, 主变T2、T4、T6 的负载率分别为1.0、0.77、0.83。

综上所述, 本文方法对主变T5的全部负荷进行了较好的消纳, 提高了该区域的负荷转供能力和设备利用率。同时, 基于负荷转移小区容载比对故障主变T5的负荷进行“按需分配”, 使配电区域中的负荷分布更加均衡。

6 结语

针对主变故障后负荷转供过程中联络线路容量不足、主变过载等问题, 提出了一种基于联络关系的主变故障负荷转供方案。该方案在配电网正常运行情况下, 利用简化的网络拓扑关系形成主变联络关系矩阵及负荷转移区域, 当主变因故障或检修退出运行时, 基于负荷转移小区容载比对故障主变负荷进行“按需分配”。在分配的过程中, 充分计及了联络线路及主变容量约束条件, 分别设计了次级负荷转供策略及二次转供策略。仿真结果表明, 该方案具有如下特点:

(1) “按需分配”的负荷转移方法, 充分考虑了联络线路容量约束、主变容量约束以及主变实际负载水平, 更符合实际, 在提高了设备利用率的同时使配电网的负荷分布更加均衡。

(2) 在负荷分配的过程中, 针对联络线路容量约束提出了次级负荷转移策略, 针对主变容量约束提出了二次转供策略, 有效提升了配电网的负荷转供能力。

参考文献

- [1] 许旭锋, 黄民翔, 王婷婷, 等. 基于模糊机会约束二层规划的配电网检修计划优化[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 157-163.
XU Xu-feng, HUANG Min-xiang, WANG Ting-ting, et al. Optimization of distribution network maintenance scheduling based on fuzzy chance-constrained bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 157-163.
- [2] 肖峻, 李振生, 张跃. 基于最大供电能力的智能配电网规划与运行新思路[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 8-14, 31.
XIAO Jun, LI Zhen-sheng, ZHANG Yue. A novel planning and operation mode for smart distribution networks based on total supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 8-14, 31.
- [3] XIAO Jun, GU Wen-zhuo, WANG Cheng-shan, et al. Distribution system security region: definition, model and security assessment[J]. IET Generation, Transmissions & Distributions, 2012, 6(10): 1029-1035.
- [4] DENG You-man, CAI Le, NI Yi-xin. Algorithm for improving the restorability of power supply in distribution system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1497-1502.
- [5] SATYANARAYANA S, RAMANA T, RAO G K, et al. Improving the maximum loading by optimal conductor selection of radial distribution systems[J]. Electric Power Components and Systems, 2006, 36(7): 747-757.
- [6] 徐志琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.
XU Zhi-qin, ZHANG Li, WANG Zeng-ping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.
- [7] 张浩, 和敬涵, 薄志谦, 等. 基于动态规划算法的故障恢复重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162-167.
ZHANG Hao, HE Jing-han, BO Zhi-qian, et al. Service restoration based on dynamic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162-167.
- [8] 廖怀庆, 刘东, 黄玉辉, 等. 考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 9-16.
LIAO Huai-qing, LIU Dong, HUANG Yu-hui, et al. Smart grid power transfer capability analysis considering integrated renewable energy resources and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 9-16.
- [9] 方汀, 王宽, 陈佑健. 变电站综合自动化系统现场调

- 试若干问题阐述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 118-121, 139.
- FANG Ding, WANG Kuan, CHEN You-jian. The elaborations about some issues in the on-site debug of the substation integrated automation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 118-121, 139.
- [10] 杜双育, 王先培, 谢光, 等. 基于 IEC61850 的变电站自动化系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 32-36, 41.
- DU Shuang-yu, WANG Xian-pei, XIE Guang, et al. Reliability evaluation of substation automation system based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 32-36, 41.
- [11] AOKI K, KUWABARA H, SATOH T, et al. Outage state optimal load allocation by automatic sectionalizing switches operation in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 2(4): 1177-1185.
- [12] 肖峻, 贡晓旭, 王成山. 配电网最大供电能力与 $N-1$ 安全校验的对比验证[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 86-91.
- XIAO Jun, GONG Xiao-xu, WANG Cheng-shan. Comparative research between total supply capability and $N-1$ security verification for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 86-91.
- [13] 罗凤章, 王成山, 肖峻, 等. 一种简捷实用的配电系统供电能力计算方法[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 56-60.
- LUO Feng-zhang, WANG Cheng-shan, XIAO Jun, et al. A simple and practical method to evaluate power supply capability of distribution system[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 56-60.
- [14] 廖怀庆, 刘东, 黄玉辉, 等. 基于公共信息模型拓扑收缩的配电网转供能力分析[J]. 电网技术, 2012, 32(6): 51-55.
- LIAO Huai-qing, LIU Dong, HUANG Yu-hui, et al. Analysis on transfer capability of distribution network based on CIM topological contraction[J]. Power System Technology, 2012, 32(6): 51-55.
- [15] 欧阳武, 程浩忠, 张秀彬, 等. 城市中压配电网最大供电能力评估方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 403-407.
- OUYANG Wu, CHENG Hao-zhong, ZHANG Xiu-bin, et al. Evaluation method for maximum load capability of urban medium-voltage distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 403-407.
- [16] 王成山, 罗凤章, 肖峻, 等. 基于主变互联关系的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 86-91.
- WANG Cheng-shan, LUO Feng-zhang, XIAO Jun, et al. An evaluation method for power supply capability of distribution system based on analyzing interconnection of main transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 86-91.
- [17] LUO Feng-zhang, WANG Cheng-shan, XIAO Jun, et al. Rapid evaluation method for power supply capability of urban distribution system based on $N-1$ contingency analysis of main-transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(10): 1063-1068.
- [18] XIAO Jun, LI Fang-xing, GU Wen-zhuo, et al. Total supply capability and its extended indices for distribution systems: definition, model calculation and applications[J]. IET Generation, Transmissions & Distributions, 2011, 5(8): 869-876.
- [19] 葛少云, 韩俊, 刘洪, 等. 计及主变过载和联络容量约束的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 97-103.
- GE Shao-yun, HAN Jun, LIU Hong, et al. Power supply capability determination considering constraints of transformer overloading and tie-line capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 97-103.
- [20] 肖峻, 谷文卓, 郭晓丹, 等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 47-52.
- XIAO Jun, GU Wen-zhuo, GUO Xiao-dan, et al. A supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 47-52.
- [21] MIRANDA V, RANITO J V, PROENCA L M. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(4): 1927-1933.
- [22] 肖峻, 徐兵山, 张跃, 等. 一种新的配电网联络线瓶颈分析与改造方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 35-41, 47.
- XIAO Jun, XU Bing-shan, ZHANG Yue, et al. A new method of bottleneck tie lines analysis and reformation for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 35-41, 47.

收稿日期: 2013-12-24; 修回日期: 2014-01-16

作者简介:

马静(1981-), 男, 博士, 副教授, 曾在美国弗吉尼亚理工大学做博士后, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: hdmajing@aliyun.com

马伟(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统供电恢复; E-mail: jnyz-mawei@163.com

王增平(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化。