

# 基于 10 kV 馈线负荷全转移约束下的变电站全停校验模型研究及应用

叶璐, 王小红, 常耀文, 韩阳, 唐朝, 张禹, 李卓雯, 曾娜  
(国网德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 配电网 10 kV 供电线路可靠性要求越来越高, 变电站是否具备全站停电升级改造和检修的条件, 缺乏规程参考和理论指导。基于配电网  $N-1$  安全性准则, 提出了变电站所属 10 kV 馈线负荷全转移的定义和条件, 建立了变电站全停校验模型, 并通过实用算例对模型的准确性和实用性进行验证。实验证明该模型有效且能够为变电站是否具备全停条件提供参考依据, 具有借鉴意义。

**关键词:** 配电网; 馈线; 负荷全转移; 全停校验

中图分类号: TM727 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)06-0009-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.06.003

## Research and Application of Full-stop Check Model for Substation Based on Full Load Transfer Constraint of 10 kV Feeder

Ye Lu, Wang Xiaohong, Chang Yaowen, Han Yang, Tang Chao, Zhang Yu, Li Zhuowen, Zeng Na  
(State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

**Abstract:** The reliability requirements of 10 kV power supply lines in distribution network are getting higher and higher. Whether the substation has the conditions for upgrading and repairing during power failure of the whole station or not, there lacks the standard reference and theoretical guidance. Based on  $N-1$  safety criterion of distribution network, the definition and conditions of full load transfer of 10 kV feeder in substation are put forward, the full-stop check model for substation is established, and the accuracy and practicability of the proposed model are verified through practical examples. The experiments prove that the proposed model is effective, and it can provide reference for whether the substation has full-stop conditions or not, which has reference significance.

**Key words:** distribution network; feeder; full load transfer; full-stop check

## 0 引言

随着人们物质生活水平的不断提高, 电网用户侧用电负荷需求也发生了一定改变, 人们对电能越来越依赖, 可靠性要求越来越高。国家和企业对电网建设和发展思路也随之巨大转变, 从以往关注发电、输电向需求侧配电网转变, 投入巨大资金对配电网进行升级改造。目前国内配电网大多采用 10 kV 电压等级, 通过配电变压器降压后直接面对广大用户。10 kV 配电网是发、输、配电系统的最末端环节, 是保障居民正常生活和城市稳定发展的基础, 也是电力可靠供应和供电优质服务的实物载体。为保

障配电网安全稳定运行, 日常检修和故障处理必不可少。

目前, 国内外对于配电网 10 kV 线路及设备的计划检修和故障隔离处理, 一般可通过与之相联络的其他 10 kV 线路倒负荷, 来实现非检修区域的负荷转移, 即线路通过  $N-1$  安全校验<sup>[1-2]</sup>。涉及到变电站长时间全停升级改造或全站故障失压后变电站所属 10 kV 线路的负荷转移, 无论是国网公司还是南方电网公司均没有明确的规范要求和校验标准。德阳电网在 2018 年进行 110 kV 德阳站长时间停电改造升级时, 就面临了这一突出问题。因此研究基于变电站 10 kV 馈线负荷全转移的全停校验模型, 具有非常重要的现实意义。文献 [3] 借鉴输电

网最大输电能力的概念提出了配电网的相关概念,但依然是基于变电站、主变压器和出线等发生  $N-1$  时,在实际运行约束下通过站内和站间联络实现负荷损失最小化的目标,且研究的重点是配电网的最大供电能力,对于是否能够在某一个变电站全停的条件下使配电网 10 kV 馈线负荷不受影响,没有做过多研究。文献 [4] 基于现有馈线互联互供的配电网关系,提出了配电网安全域模型,并运用于多联络的复杂配电网,给出了配电网安全运行区域和  $N-1$  边界,但并未考虑实际配电网运行过程中,因倒闸操作次数增加而引起的一系列优质服务、安全稳定问题。

下面考虑配电网 10 kV 馈线负荷全转移条件下对变电站全停校验分析,提出了变电站全停校验模型,对变电站是否能够具备全停的条件,给出了明确的答案,具有借鉴意义。

### 1 馈线负荷全转移的定义及条件

配电网  $N-1$  安全性准则是配电网规划和运行的重要准则,它规定了在配电网中主变压器或线路发生故障时,线路或主变压器所带负荷可通过与之联络的线路进行转供,即不对外停电。

图 1 为变电站馈线示意图:馈线 1 是常见 10 kV 配电网三联络线路,与之相联络的其他 3 条线路,分别是联络线 1、联络线 2、联络线 3,且馈线 1 与联络线 1 均来自变电站 A。一般情况下,考虑最严重的线路故障,馈线 1 出线开关跳闸,则原线路上负荷只能通过 3 条联络线转供,实现不对外停电的目标。目前,随着城市配电网建设进程的加快,10 kV 配电网中联络线较多,网架结构完善,一般情况下均可通过不超过两次的倒闸操作完成整条 10 kV 线路的负荷转移。但如果变电站 A 全站停电,则与馈线 1 所属变电站相同的联络线 1 将失去联络作用,同时该联络线自身负荷也需通过其他站外联络线实现负荷转移,即变电站 A 所属全部 10 kV 馈线负荷均只能通过其他变电站联络线实现负荷转移,即馈线负荷全转移。

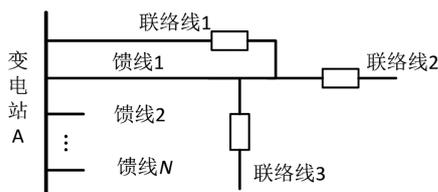


图 1 变电站馈线示意 1

在图 2 所示变电站馈线,图中变电站 A 所属 10 kV 馈线 1 与之相联络的分别是变电站 B、变电站 C 所属 10 kV 联络线 1、联络线 2。考虑极端情况,且暂不考虑 10 kV 馈线 1 的分段方式和网架结构,若变电站 A 全站停电,通过联络线倒负荷方式,在满足联络线 1、联络线 2 不过载且变电站 B、变电站 C 不过载的情况下,馈线 1 上的所有负荷可通过变电站 B、C 转供,从而实现变电站 A 所属所有 10 kV 馈线的负荷全转移。因此根据馈线负荷全转移的定义,可以得出满足馈线负荷全转移的基本条件<sup>[5]</sup>:

- 1) 该变电站所属所有 10 kV 馈线均存在至少 1 回站间联络线;
- 2) 与馈线相连的站间联络线的负荷裕度小于等于需要其转供的负荷大小;
- 3) 馈线负荷全转移后,联络线路、主变压器、变电站等不出现过负荷、低电压状态。

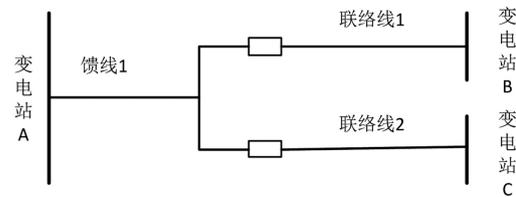


图 2 变电站馈线示意 2

### 2 变电站全停校验模型

在配电网中,由于受到变电站选址和通道受限的影响,往往需要对已有变电站进行升级改造,以满足长期负荷增长需求;但由于现场施工条件限制和电网安全规程要求,不得不选择全站停电改造,且改造周期较长。以某地市公司 110 kV 变电站为例,停电时间长达 5 个月,在此改造期间,配电网运行压力巨大,能否平稳度过负荷高峰时期,缺乏理论支撑和可行性论证,施工中能否安排全站停电进行升级改造缺乏有效规程参考和指导意义。

根据前面对变电站所属馈线负荷全转移的定义和条件约束,可以建立如下模型:

$$S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_N \quad (1)$$

$$S_N = \begin{cases} 1 & f_N \leq \max f_i + \max f_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\max f_i = \text{Max } f_i - f_i \quad (3)$$

$$\max f_j = \text{Max } f_j - f_j \quad (4)$$

$$\sum_1^N F_N \leq V_S \quad (5)$$

$$F_N \leq \text{Max } f_N \quad (6)$$

上述模型中:  $N$  为变电站 10 kV 馈线条数;  $S_N$  为同一变电站第  $N$  条 10 kV 馈线的负荷全转移标识,  $S_N = 1$  时, 则该条 10 kV 馈线上负荷能够全部转移;  $S_N = 0$  时, 则该条 10 kV 馈线上负荷不能全部转移;  $f_N$  为第  $N$  条馈线的最大负荷;  $\max f_i$ 、 $\max f_j$  为与第  $N$  条馈线相联络且负荷裕度最大的两条线路的负荷裕度;  $\text{Max } f_i$ 、 $\text{Max } f_j$  为与第  $N$  条馈线相联络且负荷裕度最大的两条线路的允许最大负荷;  $F_N$  为负荷转移后联络线路的最终负荷;  $V_S$  为变电站的允许最大负荷;  $S$  为变电站全停校验结果。

式(1)中,  $S$  为变电站所属所有 10 kV 馈线负荷全转移标识的乘积。如变电站任何一条 10 kV 馈线负荷不能全部转移, 即其中任一个  $S_N = 0$ , 则变电站全停校验结果为 0, 不能实施全站停电。由此可知: 要使  $S = 1$ , 该变电站所属所有 10 kV 馈线负荷全转移标识均为 1, 才能够实现变电站全停下的负荷全转移, 即变电站全停通过; 当  $S = 0$  时, 该变电站所属 10 kV 馈线不能够实现变电站全停下的负荷全转移, 即变电站全停校验不通过。

式(2)约束条件表示变电站第  $N$  条馈线的最大负荷  $f_N$  必须小于等于与之相联络且负荷裕度最大的两条馈线的负荷裕度之和。因现场实际倒闸规范要求, 这里暂只考虑两条相联络线路, 不考虑 3 条以上联络线路的情况。

式(3)、式(4)表示与第  $N$  条馈线相联络且负荷裕度最大的两条线路的负荷裕度计算方法。

式(5)不等式约束表示当馈线负荷转移后, 联络线路所属变电站下所有馈线负荷之和应小于等于变电站允许最大负荷, 即变电站不过载。

式(6)不等式约束表示当馈线负荷转移后, 联络线路负荷应小于线路允许最大负荷, 即线路不过载。

需要声明的是, 该模型不考虑变电站、线路的短时过载能力和转供条件下的  $N - 1$  安全校验。通过该模型的应用, 可以为变电站全停进行升级改造提供参考依据。

### 3 实用算例

图3为算例配电网的示意图, 是由4个110 kV变电站和10条10 kV馈线组成的地区实际配电网

结构模型, 为使网络拓扑清晰简化, 图中只标出了配电网馈线联络开关位置, 未标明馈线分段开关位置。假设所有馈线均采用同一种导线型号, 所有馈线允许最大负荷均为 8 MW, 同时负荷在馈线上均匀分布, 且暂不考虑分段开关位置对联络线路转供能力的影响。表1给出了本算例配电网的变电站容量参数, 表4给出了本算例配电网的馈线最大负荷及联络关系。从图3中可以看出馈线  $a_1$ 、 $b_3$  为三联络线路, 馈线  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $d_1$ 、 $d_3$  为两联络线路, 馈线  $b_1$ 、 $d_2$  为单联络线路, 且馈线  $b_2$ 、 $b_3$ 、 $d_3$  存在站内联络的情况。

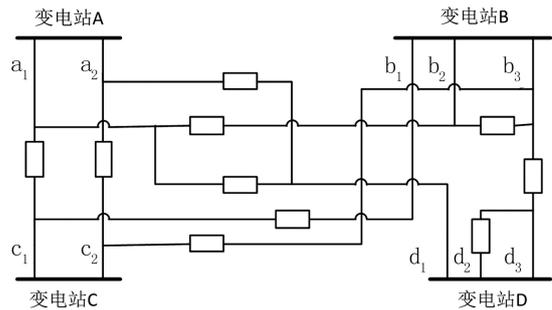


图3 算例配电网

表1 变电站容量参数

变电站名称	容量/MVA
变电站 A	20
变电站 B	40
变电站 C	40
变电站 D	48

表2 馈线最大负荷及联络关系

馈线名称	最大负荷/MW	联络线名称
$a_1$	4.0	$b_2$ 、 $c_2$ 、 $d_1$
$a_2$	3.2	$c_1$ 、 $d_1$
$b_1$	4.0	$c_2$
$b_2$	5.6	$a_1$ 、 $b_3$
$b_3$	5.2	$b_2$ 、 $c_1$ 、 $d_3$
$c_1$	5.2	$a_2$ 、 $b_3$
$c_2$	6.8	$a_1$ 、 $b_1$
$d_1$	4.8	$a_1$ 、 $a_2$
$d_2$	0.8	$d_3$
$d_3$	0.8	$b_3$ 、 $d_2$

将表1和表2作为输入量, 带入第2节所建立的变电站全停校验模型中, 无需迭代计算, 很容易可以计算出该配电网所有馈线最大负荷运行时馈线负荷全转移约束条件下的变电站校验通过结果, 如表3所示。

表3 变电站全停校验结果

变电站名称	校验结果
变电站 A	通过
变电站 B	不通过
变电站 C	通过
变电站 D	不通过

从上述校验结果可以看出,变电站 A、C 通过全停校验,即在该配电网正常运行方式下,变电站 A、C 全站停电检修时,该地区配电网能实现不对外停电。变电站 B 不通过变电站全停校验,即当前网络状况下,若变电站 B 全站停电检修,存在转供线路过载风险,建议后期加强 10 kV 馈线站间联络的投资建设,使其具备全站长时间停电检修改造的能力。变电站 D 不通过变电站全停校验,主要原因是馈线  $d_2$  属于站内单联络线路,不满足模型约束条件。

需要注意的是,所提出的变电站全停校验模型,线路运行参数均选择所有线路各自的最大负荷,负荷转供参考电力行业有关  $N-1$  校验规则,即不超过两次倒闸操作。实际工作中,由于地区负荷特性不同,在考虑同时最大负荷时,由于针对的是长时间的停电转供,因此考虑的只是理论上的最严重情况。实际电网运行中的地区最大线路负荷,还存在负荷同时率、长期特定运行方式下的  $N-1$  安全性等问题;且电网运行方式多种多样,若不受倒闸操作引起的停电次数限制,对于站间联络线路较多的线路比负荷转供较联络线路较少的线路更具优势,安全性、可靠性也将更高。

### 4 结 语

考虑 10 kV 馈线负荷全转移约束下的变电站全停校验,对于制定变电站全停检修负荷转供方式具有重要参考价值,也是制定变电站检修策略的重要依据。给出了馈线负荷全转移的定义和约束条件,并建立了该约束条件下的全站停电校验模型,通过

(上接第 8 页)

[14] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality: IEEE Std 1159-1995[S], 1995.

[15] 李天友,赵会茹,乞建勋,等. 短时停电及其影响分析[J]. 中国电力 2012 45(5): 48-51.

[16] 张林利,李建修,刘合金,等. 配电网混合线路重合闸问题研究[J]. 山东电力技术 2016 43(6): 77-79.

算例验证了模型的准确性和实用性,为配电网馈线站间联络建设提供了可靠依据,对进一步提升配电网供电服务质量打下了坚实基础,具有借鉴意义。目前该模型已经成功应用于德阳地区配电网标准化改造的项目储备方案审查和策略制定中,并取得了良好的效益,具有推广价值。

### 参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 谷文卓. 配电网最大供电能力的定义、模型与计算方法[D]. 天津:天津大学 2012.

[4] 肖峻,苏步芸,贡晓旭,等. 基于馈线互联关系的配电网安全域模型[J]. 电力系统保护与控制 2015 43(20): 36-44.

[5] 韦斌,杨丰任,曹松. 配电网闭环转供电研究及辅助软件开发[J]. 四川电力技术 2016 39(3): 67-71.

### 作者简介:

- 叶 璐(1999),本科、助理工程师,从事配电网运行、检修及系统维护等管理工作;
- 王小红(1988),本科、助理工程师,从事配电网运行、检修及系统维护等管理工作;
- 常耀文(1991),助理工程师,从事配电网运行、检修及配电网故障抢修等管理工作;
- 韩 阳(1988),工程师,从事配电网线路、设备运行管理、检修维护等工作;
- 唐 朝(1984),工程师,从事配电网运检分析管理、配电网自动化管理等工作;
- 张 禹(1985),工程师,从事配电网运维检修管理工作;
- 李卓雯(1986),硕士、工程师,从事配电网运检计划管理工作;
- 曾 娜(1987),工程师,从事配电网生产技改大修项目管理。

(收稿日期:2018-07-06)

### 作者简介:

- 朱丽媛(1968),工程师,主要研究方向为电力系统自动化;
- 高艺文(1989),工程师,主要研究方向为配电网自动化与继电保护;
- 李 熠(1981),硕士、工程师,主要研究方向为变电站集中监控。

(收稿日期:2018-08-16)