

# 提升最大供电能力的配电网馈线联络优化

唐小菊, 江东林

(国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 针对城市配电网发展中电源布点及输电走廊紧张问题, 提出一种满足  $N-1$  约束并提升现有网络供电能力的馈线联络优化方法。即基于最大供电能力指标, 首先明确站内及站间转移路径并精确分析其在各类型故障下负荷转移作用, 以母线  $N-1$  故障校验为基础, 综合考虑故障前后主变压器、馈线及开关容量约束, 通过交替求解最终得到使现有网络最大供电能力提升最多且建设成本最小的馈线联络, 最后通过算例验证了该方法的有效性。

**关键词:** 配电网; 最大供电能力; 馈线联络

中图分类号: TM727 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)04-0009-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.04.003

## Optimization Method for Feeder Link of Distribution Network Based on Total Supply Capacity

Tang Xiaojie, Jiang Donglin

(State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of power resource locations and transmission corridors in the development of urban distribution network, a new optimization method for feeder link is presented, which can satisfy  $N-1$  verification and substantially enhance total supply capacity (TSC) of distribution network. Firstly, a precise definition of interior transfer path (ITP) and feeder transfer path (FTP) is proposed and their effect under various faults is analyzed, which are on the basis of TSC and  $N-1$  fault verification of bus. And then the constraints of main transformer, feeder and switch capacity before and after the fault are considered synthetically, and the best plan of exterior feeder transfer path (EFTP) construction is proposed, which can enhance TSC of distribution network and control costs effectively. Finally, the results of calculation examples show that the proposed method is effective.

**Key words:** distribution network; total supply capacity; feeder link

## 0 引言

为保证用电经济性、可靠性并适应运行周期内负荷增长, 配电网规划通常采用容载比法, 即限定供电区域内变电设备容量与最大负荷比值, 使变电设备在运行时留有裕度以应对故障和负荷增长, 但其使变电设备投资增加。文献[1]规定: 若网络结构联系紧密, 容载比可适当降低, 并给出如增加主变压器台数、提升次级电网转移负荷能力等具体措施。

随着经济发展带来的负荷持续增长及土地资源紧缺, 在城市中心区通过新建变电站及输电走廊解决供电问题也异常困难, 挖掘并提升现有电网供电能力十分必要。因此反映配电网运行安全及效率的最大

供电能力(total supply capacity, TSC)<sup>[2-3]</sup>指标被提出, 并成功应用于网络规划及改造领域。文献[2]建立供电能力相关概念, 将模型转换为易于求解的线性规划模型, 能保证计算结果中主变压器的负载均衡。文献[3]针对输电网供电能力计算方法不足, 提出基于主变压器互联关系和前验式主动满足  $N-1$  准则的 TSC 计算方法。文献[4]提出加权联络均衡度及联络效率等新指标, 分析后可一定程度揭示馈线联络关系对 TSC 的作用机理。文献[5]在 TSC 基础上提出适于负荷增长缓慢区域的配电网规划模型, 即优先利用已有网络消纳新增负荷, 可在推迟电网投资的同时提高设备利用率。文献[6-7]则将 TSC 用于主变压器馈线联络优化并引入图论及多目标优化方法, 可减少网络联络通道建设数量并一定程度提升 TSC。

在最大供电能力指标下,首先提出站内及站间转移路径并分析其在各类型故障下负荷转移作用。综合考虑以母线  $N-1$  故障校验为基础,并满足故障前后主变压器、馈线及开关容量约束,最终得到使供电能力提升幅度最大且建设成本最小的馈线联络。

## 1 供电能力模型

### 1.1 基本定义

在文献[1-2]基础上首先给出定义。

1) 最大供电能力  $S_{TSC}$ : 一定供电区域内,考虑运行实际且满足  $N-1$  校验的最大负荷供应能力,即

$$S_{TSC} = \max \sum_{x \in M} P_{f_x} \quad (1)$$

式中:  $P_{f_x}$  为满足  $N-1$  校验的馈线  $f_x$  忽略无功功率后的负荷;  $M$  为满足  $N-1$  校验的馈线集合。

2) 站内联络: 同变电站内不同主变压器通过母线及分段开关形成的连接路径。

3) 馈线联络: 不同主变压器通过配电馈线形成的连接路径。根据是否属于同站主变压器可具体分为站内馈线联络和站间馈线联络。

4) 站内转移路径 (interior transfer path, ITP): 若主变压器  $i$  与  $j$  之间存在站内联络,故障后馈线  $f_x$  经分段开关由主变压器  $j$  供电的路径为站内转移路径  $e_{(x,j)}$ 。

$$S_{e_{(x,j)}} \leq S_{f_y} (f_x \in \varphi_i \text{ 且 } f_x \notin \varphi_j) \quad (2)$$

式中:  $S_{f_y}$  为馈线  $f_y$  的容量;  $\varphi_i$  和  $\varphi_j$  分别为正常方式下由主变压器  $i$  和  $j$  供电的馈线集合。

5) 站内转移通道 (interior transfer channel, ITC): 主变压器  $i$  与  $j$  之间所有 ITP 集合,其传输功率容量为

$$S_{E_{(i,j)}} = \sum_{e_{(x,j)} \in E_{(i,j)}} S_{e_{(x,j)}} \quad (3)$$

$$S_{E_{(i,j)}} \leq \min(S_{secij}, S_{Tj}(\eta_{jmax} - \eta_j)) \quad (4)$$

式中:  $S_{secij}$  为主变压器  $i, j$  之间分段开关传输功率容量;  $\eta_{jmax}$  为主变压器  $j$  的允许最大负载率。

6) 馈线转移路径 (feeder transfer path, FTP): 若主变压器  $i$  与  $j$  之间分别通过馈线  $f_x$  与  $f_y$  形成馈线联络,故障后馈线  $f_x$  可转为经  $f_y$  由主变压器  $j$  供电的馈线转移路径  $f_{(x,y)}$ ,根据主变压器  $i$  与  $j$  是否属于同站,可分为站内馈线转移路径 (interior feeder transfer path, IFTP) 和站间馈线转移路径 (exterior feeder transfer path, EFTP),其传输功率容量为

$$S_{f_{(x,y)}} = S_{f_y} (f_x \in \varphi_i \text{ 且 } f_x \in \varphi_j) \quad (5)$$

7) 馈线转移通道 (feeder transfer channel, FTC): 主变压器  $i$  与  $j$  之间所有馈线转移路径集合,根据主

变压器  $i$  与  $j$  是否同站,可分为站内馈线转移通道 (interior feeder transfer channel, IFTC) 和站间馈线转移通道 (exterior feeder transfer channel, EFTC),其传输功率容量为

$$S_{F_{(i,j)}} = \sum_{f_{(x,y)} \in F_{(i,j)}} S_{f_{(x,y)}} \quad (6)$$

### 1.2 联络类型分析

当配电设备发生  $N-1$  故障后,原馈线负荷可通过 ITC、IFTC 或 EFTC 转由站内或站外其他主变压器承担,而为保证故障后满足  $N-1$  安全约束,故障前供电区域内主变压器不能均满载或保持较高负载率,需留有承担故障后额外转移负荷的裕度,这也是制约最大供电能力的关键瓶颈。

配电网中可能发生  $N-1$  故障的设备包括主变压器、母线及馈线等。馈线故障后,故障点上游的非故障区继续由原供电路径供电,而下游非故障区能否恢复仅与馈线是否形成联络相关,因此暂不考虑馈线故障。

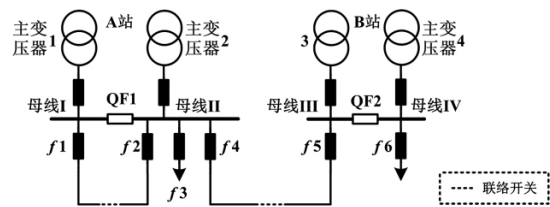


图1 配电网局部网架

以图1配电网为例,设各主变压器、各馈线负荷、容量和最大负载率均相等,各分段开关传输功率容量无限大。则A站母线II上馈线  $f_2$  至  $f_4$  形成的联络及故障后区域是否具备恢复条件如表1所示。

表1 馈线联络情况

馈线	转移路径	类型	故障后恢复条件		
			主变压器2	母线II	上级电源
$f_2$	$e_{(2,1)}$	ITP	√	×	×
	$f_{(2,1)}$	IFTP	√	√	×
$f_3$	$e_{(3,1)}$	ITP	√	×	×
	$e_{(4,1)}$	ITP	√	×	×
$f_4$	$f_{(4,5)}$	EFTP	√	√	√

1) 当主变压器2故障时,由于各馈线经母线II、QF1、母线I至主变压器1的ITP可正常使用,故馈线  $f_2$  至  $f_4$  负荷均可恢复。

2) 当母线II故障时,各ITP均失去作用,仅可通过  $f_{(2,1)}$  和  $f_{(4,5)}$  分别恢复馈线  $f_2$  和  $f_4$  负荷。

3) 因配电网常以开环方式运行,故同属A站的主变压器1和2正常运行时在同一时间断面仅可使用唯一且相同的上级电源,上级电源故障(考虑同

一时刻备用电源因某种原因未能自投成功)虽然不属于  $N-1$  故障,但该类型事件发生概率不容忽视。上级电源故障后,ITP 及 IFTP 均失去作用,仅可通过  $f_{(4,5)}$  恢复馈线  $f_4$  负荷。 $f_{(4,5)}$  仅在 A 站和 B 站上级电源同时故障后才失去作用,而这一事件的发生概率远远小于 A 站上级电源故障概率。

综上,母线  $N-1$  故障对负荷恢复更具挑战性,相对 ITP 及 IFTP,EFTP 用于负荷恢复具有明显优势,故形成 FTP 时优先选择 EFTP 形式并采用母线  $N-1$  故障进行校验。

## 2 馈线联络优化模型

### 2.1 目标函数

设馈线连接形成的联络结构仅考虑手拉手单环网模式,联络优化即选择适当位置新建线路及联络开关使其形成 FTP 以提升  $S_{TSC}$ ,为满足上述要求则必须增加网络建设投资,但是如建设投资过多经济性会降低。因此考虑优化后供电能力提升部分在运行期内可产生效益、馈线联络新建成本以及电价等因素,馈线联络优化的目标函数为

$$\max F = (\sum_i^M P_{fi} - S_{TSC}^*) \alpha T^* - \sum C_{total} \quad (7)$$

式中:  $S_{TSC}^*$  为优化前最大供电能力;  $T^*$  为设备运行期;  $\alpha$  为综合售电收益。

### 2.2 约束条件

对给定供电区域,馈线联络优化过程中需计算  $S_{TSC}$  并进行  $N-1$  校验以满足下约束。

#### 1) 正常运行时

$$S_{Ti} \eta_i = \sum_{f_x \in \varphi_i} P_{fx} \quad (8)$$

$$\eta_i \leq \eta_{imax} \quad (9)$$

式(8)为忽略无功补偿的功率平衡约束,其中  $P_{fx}$  为故障前馈线  $f_x$  负荷;式(9)为主变压器负载率约束。

#### 2) 故障后

$$\sum_{x \in \varphi_i^*} P_{fx} = \sum_{j \in \Omega_1^i} P_{T(i,j)} \quad (10)$$

$$P_{T(i,j)} = \sum_{f_{(x,y)} \in F(i,j)} P_{f(x,y)} \quad (11)$$

$$\sum_{j \in \Omega_1^i} P_{T(i,j)} + S_{Tj} \eta_j \leq S_{Tj} \eta_{jmax} \quad (12)$$

$$P_{f(x,y)} + P_{fy} \leq S_{f(x,y)} \quad (13)$$

式(10)和式(11)为通过 FTP 转移负荷的功率平衡约束,当对第  $i$  段母线进行  $N-1$  校验时,  $P_{T(i,j)}$

为主变压器  $i$  向  $j$  转移的负荷,  $\varphi_i^*$  为由主变压器供电且与其他馈线生成 FTP 的馈线集合;  $\Omega_1^i$  为主变压器  $i$  存在 FTC 的主变压器集合;  $P_{f(x,y)}$  为馈线  $f_x$  向  $f_y$  转移的负荷;式(12)表示主变压器通过 FTC 承担负荷后的主变压器容量约束;式(13)表示 FTP 的容量约束。

### 2.3 网络化简

对已建成或已完成阶段规划供电区域  $\Theta$  内的馈线联络进行优化以提升其  $S_{TSC}$ ,首先需将供电网络准确分割。配电网由于馈线联络无具体规则导致接线错综复杂,  $\Theta$  内主变压器并不只相互形成馈线联络,与  $\Theta$  以外主变压器形成 FTC 的情况也较常见。若严格按照式(7)至式(13)考虑所有站内及馈线联络,则除  $\Theta$  以外还需将所有与  $\Theta$  内主变压器存在 FTC 的主变压器均考虑进来,这会导致问题求解规模过大且无必要。因此,采用输电网区外等值思想进行网络化简,即将所有  $\Theta$  以外的主变压器忽略,若  $\Theta$  内第  $i$  台与  $\Theta$  外主变压器形成有馈线转移通道,则对主变压器  $i$  进行  $N-1$  校验时,馈线联络转移负荷的功率平衡约束式(10)需用式(14)、式(15)代替,即:

$$\sum_{x \in \varphi_i^*} P_{fx}^* = \sum_{j \in \Omega_1^i} P_{T(i,j)} \quad (14)$$

$$\sum_{x \in \varphi_i^*} P_{fx}^* = \sum_{x \in \varphi_i^*} P_{fx} - \sum_{j \in \Omega_2^i} P_{T(i,j)} \quad (15)$$

式中,  $\Omega_2^i$  为不属于  $\Theta$  且与主变压器  $i$  形成 FTC 的主变压器集合。

### 2.4 馈线选择

在进行区域等值后对  $\Theta$  优化形成某一馈线联络实质变为选择满足约束条件且未形成单环网的馈线,新建线路联络开关并对原馈线进行必要改造使其形成单环网。新增某一馈线联络,其投资为:

$$C_{total} = C_{new} + C_{swith} + C_{ref} + C_{mat} \quad (16)$$

$$C_{new} = Q_{new} l_{new} \quad (17)$$

$$C_{ref} = Q_{ref} l_{ref} \quad (18)$$

式(16)、式(17)和式(18)分别为总投资、新建线路和改造旧线路投资;  $C_{swith}$  为联络开关价格;  $C_{mat}$  为维护费用;  $Q_{new}$  和  $Q_{ref}$  分别为新建线路和改造旧线路的单价;  $l_{new}$  和  $l_{ref}$  分别为考虑曲折系数的新建线路和改造旧线路长度。

由上述可知,形成 FTP 时联络开关投资相对固定,而其他投资则随线路长度和容量等因素波动。为避免馈线间距离过远或线路容量差距较大造成投

资浪费,针对形成馈线联络时的馈线选择,考虑运行实际制定以下选择原则:

- 1) 所选馈线均未形成环网;
- 2) 优先选择可形成 EFTP 的馈线;
- 3) 两条馈线传输功率容量需尽量匹配。

### 3 求解流程

馈线联络优化步骤如下:

- 1) 输入原始数据,设定需新增馈线联络数量或  $S_{TSC}$  增长量;
- 2) 据 2.3 节网络化简步骤,删除馈线联络优化不涉及的主变压器;
- 3) 刷新网络拓扑数据,对每台主变压器  $i$  生成  $\Omega_1^i$ 、 $\Omega_2^i$  及  $\varphi_i$ ;
- 4) 在步骤 3) 基础上任意主变压器  $i$ 、 $j$  生成其 FTP 并计算其容量,生成 FTC 并计算其容量  $S_{F(i,j)}$ ;
- 5) 生成可反映主变压器连接关系的联络矩阵;
- 6) 根据 2.4 节馈线选择原则搜索所有可能的馈线联络新增位置;
- 7) 计算步骤在 6) 每个新增位置新增馈线联络后整个网络的  $S_{TSC}$ ,并由此计算  $\max F$ ,采用母线  $N-1$  校验,馈线负荷仅可通过 IFTC 或 EFTC 转移;
- 8) 按  $\max F$  大小对计算结果排序;
- 9) 选择最优排序结果作为馈线联络新增位置;
- 10) 判定新增馈线联络数量或  $S_{TSC}$  增长量是否满足要求,如满足则继续步骤 11), 否则返回步骤 3);
- 11) 结束。

### 4 算例

为验证上述馈线联络优化方法,现对图 2 测试系统进行仿真分析,测试系统包含 4 座 110 kV 变电站 A-D,各站主变压器容量、馈线数量及网络现有馈线连接如图所示,测试系统共 40 条馈线,其中  $f_{11}$  等 18 条馈线形成 EFTP,  $f_{14}$ 、 $f_{21}$  形成 IFTP,假设无论馈线是否形成 FTP,正常方式下由同一台主变压器供电的各馈线负荷必须与其馈线功率容量成比例,且计算  $S_{TSC}$  仅可计及满足母线  $N-1$  故障校验的馈线,负荷算法在 core i5 3.2 GHz 计算机 Matlab 环境下实现。

1) 设各馈线容量  $S_f$  相同,为进行对比,定义完全供电能力(unreserved supply capacity, USC): 一定

供电区域内,无需满足  $N-1$  校验,所有馈线负荷总和为  $S_{USC}$ ;随着  $S_f$  递增,测试系统  $S_{USC}$  和  $S_{TSC}$  变化趋势如图 3 所示。

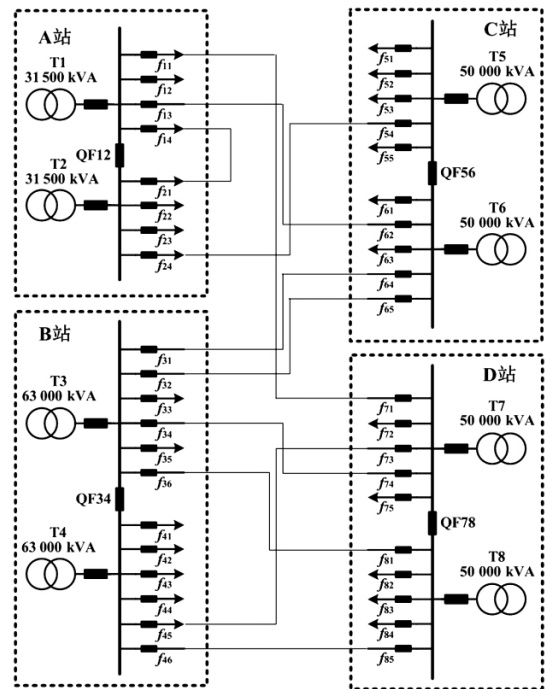


图 2 测试系统

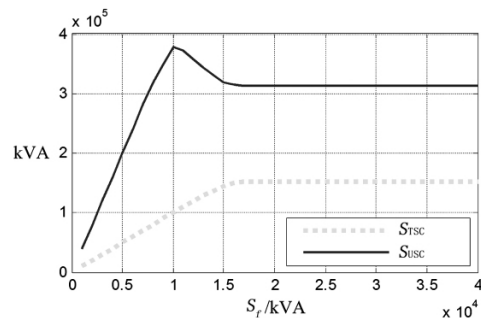


图 3 馈线负荷总和及最大供电能力

由图 3 可知,随着  $S_f$  增加,  $S_{USC}$  在  $S_f$  为 10 400 kVA 时达到峰值 378 480 kVA,之后递减并稳定在 312 130 kVA。分析可知,当  $S_f$  在 0 ~ 10 000 区间递增时,  $S_{USC}$  线性增长并达到 37 848 kVA,该值已接近测试系统主变压器容量极限,之后随着  $S_f$  继续增加,其增加部分更多用于承担母线  $N-1$  故障后其他馈线的转移负荷,而为了满足承担转移负荷后的约束,则需在正常方式下进一步降低馈线功率,故  $S_{USC}$  递减。

而  $S_{TSC}$  则随  $S_f$  递增,在  $S_f$  为 17 000 kVA 时达到峰值 152 290 kVA,之后趋于稳定,表明  $S_f$  大于 17 000 kVA 后继续增加,对承担母线  $N-1$  故障后其他馈线转移而来负荷影响甚微,为提升  $S_{TSC}$  需要进一步对当前供电网络结构进行优化,这也与

$S_f$ 在 17 000 kVA 后  $S_{TSC}$  达到稳定相对应。

2) 设测试系统各馈线容量  $S_f$  为 17 000 kVA, 由上可知测试系统  $S_{TSC}$  为 152 290 kVA, 现需新建 1 条 FTP, 使测试系统  $S_{TSC}$  增长幅度最大且成本最小。新增馈线联络均视为新建线路及联络开关, 联络开关价格  $C_{switch}$  取 10 万元/台, 新建线路费用  $C_{new}$  取 1000 元/m, 维护费用  $C_{mat}$  取 300 元/(m·a), 运行周期  $T^*$  取 15 年, 综合售电收益  $\alpha$  取 0.5 元/kWh。

新建 1 条 FTP 后测试系统  $S_{TSC}$  最多增长 17 340 kVA 达到 169 640 kVA, 可使  $S_{TSC}$  增长量达 17 340 kVA 的备选 FTP 总共 16 条, 均为 EFTP 且属主变压器 T4 和 T5 的站间馈线转移通道  $F_{(4,5)}$ , 而其建设及维护成本则因各备选 EFTP 中需新建线路长路不同而不同, 其中成本最优的 3 条备选 FTP 如表 2 所示。

表 2 备选 EFTP 排序

EFTP	MaxF /万元	$\Delta S_{TSC}$ /kVA	$\Sigma C_{total}$ /万元	$L_{new}$ /km
$f_{41} - f_{53}$	113 638	17 340	285.0	0.50
$f_{41} - f_{52}$	113 556	17 340	367.5	0.65
$f_{41} - f_{53}$	113 253	17 340	670.0	1.20

由表 2 可知, 在  $f_{41} - f_{53}$  处建设 FTP 为最佳选择, 而测试系统如严格按照满足母线  $N-1$  故障校验为前提, 则经过运行周期 15 年后, 新建 FTP 的建设及维护成本相对其  $S_{TSC}$  增长量带来的经济效益可忽略不计。因此, 选择备选路径建设 FTP 时, 应优先以  $S_{TSC}$  增长量最大为前提。

3) 设测试系统各馈线容量与 2) 条件相同, 现为测试系统设定  $S_{TSC}$  增长目标 50 000 kVA, 按所提方法, 每轮次均以  $S_{TSC}$  增长量最大为首要目标, 再根据其成本为 FTP 选择依据, 不断在最佳备选路径上建设 FTP, 直到  $S_{TSC}$  增长量满足要求, 即最佳方案; 最佳方案 FTP 建设顺序如表 3 所示。

表 3 最佳方案

建设顺序	EFTP	$\Sigma C_{total}$ /万元	$\Delta S_{TSC}$ /kVA	$S_{TSC}$ /kVA
1	$f_{41} - f_{53}$	285	17 340	169 640
2	$f_{52} - f_{72}$	312	16 660	186 300
3	$f_{22} - f_{44}$	389	15 300	201 600
4	$f_{12} - f_{43}$	450	15 300	216 900

由表 3 可知, 依次建设  $f_{41} - f_{53}$  等 4 条 FTP 后测试系统由 152 290 kVA 增长至 216 900 kVA, 增长幅度 64 610 kVA, 每一轮选择最佳 FTP 建设后其为测试系统带来的  $S_{TSC}$  增长量呈递减趋势。

为进行对比, 随机在备选路径上建设相同数量

EFTP, 即随机方案; 最佳方案及随机方案的成本及  $S_{TSC}$  增长量见表 4。由表 4 可知, 在成本及  $S_{TSC}$  增长量方面, 所提方法较随机方案更具优势。

表 4 方案对比

方案	$\Sigma C_{total}$ /万元	$\Delta S_{TSC}$ /kVA
最佳方案	1436	64 610
随机方案	2539	45 178

## 5 结 语

以最大供电能力指标为基础, 通过对 EFTP 建设进行单次或阶段优化, 可有效提升配电网最大供电能力并保证 FTP 综合成本精确可控, 有效兼顾配电网可靠性及经济型, 主要体现在: 1) EFTP 在应对多种类型故障方面具有明显优势; 2) 如严格按照满足母线  $N-1$  故障校验为前提, 运行周期内新建 FTP 其  $S_{TSC}$  增长量带来经济效益远大于综合成本。故选择备选路径建设 FTP 时, 优先以  $S_{TSC}$  增长量最大为依据。

### 参考文献

- [1] 城市电力网规划设计导则: Q/GDW156-2006 [S], 2006.
- [2] 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): 47-53.
- [3] 王成山, 罗凤章, 肖峻, 等. 基于主变互联系数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.
- [4] 肖峻, 郭晓丹, 王成山, 等. 配电网最大供电能力模型解的性质 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 59-66.
- [5] 肖峻, 张婷, 张跃, 等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 106-113.
- [6] 韩俊, 刘洪, 葛少云, 等. 面向供电能力提升的主变压器站间联络结构优化建模 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 42-47.
- [7] 葛少云, 韩俊, 刘洪, 等. 基于供电能力的主变站间联络结构优化 [J]. 电网技术, 2012, 36(8): 129-135.

作者简介:

唐小菊(1992), 助理工程师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制;

江东林(1986), 工程师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制。

(收稿日期: 2018-03-01)