基于输配全局的城市电网供电能力研究

孙晓艳[1],刘俊勇[1],魏震波[1],郭焱林[1],蒋 乐[2]
(1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;2. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘要:提出一种基于输配全局的城市电网供电能力分析模型。采用基于直流潮流的线性规划模型对城市电网输电网络供电能力进行求解并将其作为系统上层约束;将传统配电网模型细化至中压馈线,分别构建高、中压配电网供电能力模型;计算 $N-1$ 安全约束下高压配电线路、中压配电变压器及中压配电线路在不同转供方式下对应的最大供电能力,选取其中最小值作为系统最大供电能力。算例结果表明:基于输配全局的分析方法可以有效量化输电网对城市电网供电能力的影响,同时根据不同转供方式下的供电能力差异能够直观地对变压器故障情况下的负荷转移方式做出选择,验证了所提模型的有效性。

关键词:供电能力;城市电网;$N-1$ 安全约束;负荷转移
中图分类号:TM 761 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.015

0 引言

城市电网作为连接发输电系统与城市用户的纽带,其安全运行至关重要。我国城市电网主要由500 kV 或 220 kV 的输电网络和 110 kV 及以下电压等级的配电网络构成,各电压等级之间存在网络互联及电能传递。供电能力作为衡量电网承载能力的重要指标,其合理性与准确性对于城市电网的运行规划有重要的指导意义。

当前,供电能力的计算方法可以分为基于潮流计算的求解方法和基于配电网安全可靠运行的方法。前者主要包含尝试法[1]、最大负荷倍数法[2]、网络最大流法[3]等。该类方法虽能够求得网络在正常运行情况下满足各类约束条件的最大负荷承载能力,但并未考虑网络安全运行需求。后者主要有容载比法[4]、负荷能力法[5]以及基于 $N-1$ 安全约束的供电能力计算方法[6-10]等。其中,容载比法较为粗略,是工程上常用的方法;负荷能力法受人为因素的影响较大;基于 $N-1$ 安全约束的供电能力计算方法通过分析网络的联络结构进行供电能力计算,该方法求解简单、便捷实用,但应用范围有局限,计算准确性不高。

从分析对象上看,当前供电能力研究主要集中在中压配电网。由于 10 kV 以下的网络中存在大量的联络开关,负荷与电源关系复杂,因此针对中压配电网的供电能力研究大都是将负荷集中到 10 kV 母线的馈线出口,忽略 10 kV 以下网架结构约束和负荷馈线分布情况。如文献[11]提出了计及主变 $N-1$ 校验的中压配电网最大供电能力评估方法,而在负荷转供过程中并未考虑主变过载引起的二次转供问题以及联络容量约束的影响;文献[12]在此基础上提出了考虑联络容量限制及主变过载的改进评估方法,计算准确性有所提高,但并未计及馈线 $N-1$ 安全约束;针对此,文献[13]在主变 $N-1$ 校验的基础上同时计及了馈线 $N-1$ 校验,提出了基于馈线互联关系的最大供电能力模型,计算精度进一步提高。

然而,这种局限于中压配电网的供电能力评估,忽略了电网整体拓扑结构的影响,且将配电网络与输电网络割裂开,分析结果较为局限。因此,文献[14]提出了基于主变互联关系并计及 $N-1$ 准则的高压配电网络供电能力模型,但文中侧重于高压配电网,并未对中压配电网进行详细建模,忽略了中压网架结构对高压配电网供电能力的影响;文献[15]在对高压配电网最大供电能力分析建模的基础上,同时考虑了 220 kV 输电网络对高压配电网供电能力的影响,提出了城市电网输配一体的全局供电能力分析方法,但其对于高压配电网最大供电能力的分析仅考虑了主变 $N-1$ 校验,且该文主要以刻画电源负荷关系为出发点,其模型受接线模式的影响有一定的局限性;文献[16]则提出了计及高压配电网转供能力的 220 kV 片区电网供电能力计算模型,突出了高压配电网重构对网络供电能力的提升作用,但其所提出的变电单元组模型是以 110 kV 变电站为计算节点,并未计及中压配电网对供电能力的影响。

综上研究与分析,本文提出一种基于输配全局的城市电网供电能力分析模型。该模型在输、配电网建模分析的基础上,考虑输电网供电能力约束,求解高、中压配电网各单元(高压配电线路、中压配电变压器、中压馈线)在各自转供方式下满足 $N-1$ 安全校验下的最大供电能力,以其中最小值作为系统的最大供电能力。最后,在实际系统中对模型的有效性进行验证。

1 城市输电网供电能力分析

输电网一般采用闭环运行,满足 $N-1$ 校验,在此电压等级下,支路电阻相对于电抗而言较小,且城市电网输电路径较短,支路两端相角差不大,因此本

收稿日期:2017-12-29;**修回日期**:2018-07-27

文采用基于直流潮流的线性规划模型[4]对城市电网中的输电网络最大供电能力进行求解,数学描述如下。

目标函数为:

$$P_{\mathrm{LSC}} = \max \sum_{i \in n_{\mathrm{p}}} P_i \tag{1}$$

其中,P_{LSC}为输电网最大供电能力;P_i 为各高压配电变压器所带负荷;n_{p} 为负荷点集合。

约束条件如下。

a. 功率平衡约束:

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{\theta} \tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{P}$ 为有功注入向量;$\boldsymbol{B}$ 为节点导纳矩阵;$\boldsymbol{\theta}$ 为节点电压相角向量。

b. 节点功率约束:

$$\underline{P}_j \leqslant P_j \leqslant \overline{P}_j \quad j \in n_{\mathrm{b}} \tag{3}$$

其中,n_{b} 为网络中所有出力节点(不含平衡节点)和负荷节点的集合;$\overline{P}_j$ 和$\underline{P}_j$分别为节点功率的上、下限。考虑到输电网各负荷节点上限不可能超出其所带高压变压器的容量,因此将所带高压变压器容量限值作为负荷节点的出力上限。

c. 支路功率约束:

$$\underline{l}_i \leqslant l_i \leqslant \overline{l}_i \quad i \in n_{\mathrm{l}} \tag{4}$$

其中,n_{l} 为网络支路集合;$\underline{l}_i$、$\overline{l}_i$ 分别为支路正、反方向的功率限值。变压器的容量约束为变压器额定容量,线路的容量约束为线路热极限容量。支路中包括所有线路和变压器。

将上述模型经过线性化处理,即可将原问题转化为线性规划问题,其线性规划模型如下。

目标函数为:

$$P_{\mathrm{LSC}} = \max(\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}) \tag{5}$$

其中,$\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} = [C_1, C_2, \cdots, C_b]$,$C_i = 1$,$b$ 为网络中所有出力节点(不含平衡节点)和负荷节点总数。

区间约束为:

$$\underline{\boldsymbol{L}} \leqslant \boldsymbol{A}\boldsymbol{P} \leqslant \overline{\boldsymbol{L}},\ \boldsymbol{A} = \boldsymbol{B}_{\mathrm{L}}\boldsymbol{R}\begin{bmatrix} \boldsymbol{B}^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中,$\overline{\boldsymbol{L}}$、$\underline{\boldsymbol{L}}$ 分别为支路功率上限列向量、下限列向量;$\boldsymbol{B}_{\mathrm{L}}$ 为支路导纳对角阵;$\boldsymbol{R}$ 为支路节点关联矩阵。

边界约束为:

$$\underline{P}_j \leqslant P_j \leqslant \overline{P}_j \quad j \in n_{\mathrm{b}} \tag{7}$$

对于区间约束的处理,可通过引入松弛变量将其划分为等式约束,这里假设 $\underline{\boldsymbol{L}} = -\overline{\boldsymbol{L}}$,实现方法如下。

引入松弛变量 $\boldsymbol{S}$,则区间约束可以等价表示为:

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{A}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{I}\boldsymbol{S} = \overline{\boldsymbol{L}} \\ 0 \leqslant \boldsymbol{S} \leqslant 2\overline{\boldsymbol{L}} \end{Bmatrix} \tag{8}$$

其中,$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

城市输电网供电能力求解过程如图 1 所示。

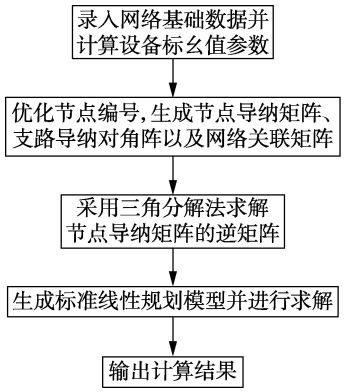


图 1　城市输电网最大供电能力计算流程图

Fig.1　Flowchart of maximum power supply capability calculation for urban transmission network

2　高压配电网供电能力分析

2.1　高压配电网供电能力的相关概念

高压配电系统以 220 kV/500 kV 变电站为直接电源向中压配电变电站输送电能,其额定电压等级通常为 110 kV/35 kV,有些城市也会采用 66 kV 电压等级。其接线模式主要有直供接线、T 型接线、链式接线及多种接线的混合方式[17]。

高压配电网的供电能力定义为在满足 $N-1$ 安全约束的前提下,即任意一条高压配电线路因故障或检修退出运行时保证负荷的不间断连续供电,高压配电系统可以最大供应的负荷容量。对于高压配电线路进行 $N-1$ 校验时,负荷可以通过高压配电线路转供,也可以通过中压配电线路转供。

2.2　高压配电网网架结构化简

若研究区域内有 n 座高压配电变电站,分别编号为 1—n,相应站内主变台数分别为 N_{t1}—N_{tn},对于变电站 i 的 j 号主变编号为 $\sum_{k=1}^{i-1} N_{\mathrm{t}k} + j$,区域内共有 N 台高压配电变压器,$N = N_{\mathrm{t1}} + N_{\mathrm{t2}} + \cdots + N_{\mathrm{tn}}$,有 l 条高压配电线路。

高压配电线路与高压配电变电站的主变对应关系用矩阵 $\boldsymbol{E}$ 表示。

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} E_{1,1} & \cdots & E_{1,j} & \cdots & E_{1,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_{i,1} & \cdots & E_{i,j} & \cdots & E_{i,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_{l,1} & \cdots & E_{l,j} & \cdots & E_{l,N} \end{bmatrix} \tag{9}$$

其中,矩阵元素 $E_{i,j}$ 表示高压配电线路 i 与高压配电变压器 j 的从属关系,若高压配电线路 i 属于高压配电变压器 j 的出线,则 $E_{i,j} = 1$,否则 $E_{i,j} = 0$。矩阵的行表示的是与高压配电线路相关联的高压配电变压器;列表示的是一台高压配电变压器的所有高压出线,刻画的是以高压配电变电站为电源、中压配电变电站为负荷的高压配电网源-网从属关系。

若研究区域内有 m 座中压配电变电站，分别编号为 1—m，相应站内主变台数分别为 M_{t1}—M_{tm}，对于变电站 i 的第 j 号主变编号为 $\sum_{k=1}^{i-1} M_{tk}+j$，区域内共有 M 台中压配电变压器，$M=M_{t1}+M_{t2}+\cdots+M_{tm}$。

高压配电线路与中压配电变电站的主变对应关系用矩阵 $\boldsymbol{F}$ 表示。

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix} F_{1,1} & \cdots & F_{1,j} & \cdots & F_{1,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ F_{i,1} & \cdots & F_{i,j} & \cdots & F_{i,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ F_{l,1} & \cdots & F_{l,j} & \cdots & F_{l,M} \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中，矩阵元素 $F_{i,j}$ 表示高压配电线路 i 与中压配电变压器 j 的所属关系，若高压配电线路 i 属于中压配电变压器 j 的供电路径，则 $F_{i,j}=1$，否则 $F_{i,j}=0$。矩阵的行表示的是与高压配电线路相关联的中压配电变压器；列表示的是该中压配电变压器所有的供电路径，刻画的是以高压配电变电站为电源、中压配电变电站为负荷的高压配电网网-荷连接关系。

对高压配电线路进行 $N-1$ 校验时，根据中压配电变压器通过高压配电网络进行负荷转供时的供电路径，建立转供矩阵 $\boldsymbol{T}$。

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} T_{1,1} & \cdots & T_{1,j} & \cdots & T_{1,l} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T_{i,1} & \cdots & T_{i,j} & \cdots & T_{i,l} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T_{M,1} & \cdots & T_{M,j} & \cdots & T_{M,l} \end{bmatrix} \tag{11}$$

其中，矩阵元素 $T_{i,j}$ 表示中压配电变压器 i 与高压配电线路 j 的转带关系，若中压配电变压器 i 可由高压配电线路 j 进行转供，则 $T_{i,j}=1$，否则 $T_{i,j}=0$。矩阵的行表示一台中压配电变压器的所有可转供高压配电线路。

若中压配电变电站不存在高压转供线路，则需通过中压配电网络进行转供，根据中压配电网络主变互联关系得到联络容量约束矩阵 $\boldsymbol{G}$[12]。

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix} G_{1,1} & \cdots & G_{1,j} & \cdots & G_{1,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ G_{i,1} & \cdots & G_{i,j} & \cdots & G_{i,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ G_{M,1} & \cdots & G_{M,j} & \cdots & G_{M,M} \end{bmatrix} \tag{12}$$

其中，矩阵元素 $G_{i,j}$ 表示中压配电变压器 i 与中压配电变压器 j 之间的极限联络容量。

2.3 高压配电网供电能力计算模型

对于高压配电系统，其满足 $N-1$ 安全约束下的最大负荷供应能力为：

$$P'_{\mathrm{LSC}}=\max\sum_{j=1}^{M} P_{\mathrm{mt}j} \tag{13}$$

其中，P'_{LSC} 为高压配电系统的最大供电能力；$P_{\mathrm{mt}j}$ 为中压配电变压器 j 所带负荷。下文中以 i、l 标识线路，j、k 标识主变。

当高压配电线路 i 进行 $N-1$ 校验时，首先根据矩阵 $\boldsymbol{F}$ 中第 i 行的元素，能够确定与其相连的受到线路 i 影响的中压配电变压器编号；然后根据矩阵 $\boldsymbol{T}$ 中对应编号的列元素，判断这些受到影响的变压器是否存在可转供的高压配电线路，若 $\sum_{l} T_{j,l}\neq 0$，则说明该变压器存在可转供的高压配电线路，若 $\sum_{l} T_{j,l}=0$，则只能通过中压配电网络转供。

当对高压配电线路 i 进行 $N-1$ 校验时，应满足以下约束。

a. 负荷转带约束：

$$P_{\mathrm{mt}j}=P_{\mathrm{H}j}+\sum_{k}(1-F_{i,k})P_{\mathrm{M}j,k} \tag{14}$$

其中，$P_{\mathrm{H}j}$ 为受线路 i 影响的中压配电变压器 j 通过高压配电线路进行转供的负荷，$\sum_{l} T_{j,l}=0$ 时，$P_{\mathrm{H}j}=0$；$P_{\mathrm{M}j,k}$ 为中压配电变压器 j 通过中压配电线路向中压配电变压器 k 转供的负荷，此时中压配电变压器 j 与 k 存在中压馈线联络。

b. 中压配电线路联络容量约束：

$$P_{\mathrm{M}j,k}\leqslant G_{j,k} \tag{15}$$

其中，$G_{j,k}$ 为中压配电变压器 j 向中压配电变压器 k 转供的线路极限容量。

c. 高压配电线路容量约束：

$$P_{\mathrm{H}j}+\sum_{k}(1-F_{i,k})P_{\mathrm{M}j,k}+P_{\mathrm{mt}k}\leqslant D_{\mathrm{l}} \tag{16}$$

其中，D_{l} 为高压配电线路的极限传输容量，线路 i 故障所影响的中压配电变压器 j 通过高压配电网和中压配电网进行转供后高压配电线路不过载。

d. 中压配电变压器容量约束：

$$\sum_{j}(1-F_{i,k})P_{\mathrm{M}j,k}+P_{\mathrm{mt}k}\leqslant R_{\mathrm{mt}k} \tag{17}$$

其中，$R_{\mathrm{mt}k}$ 为中压配电变压器 k 的容量。线路 i 故障所影响的中压配电变压器 j 通过中压配电网进行转供，转供后各中压配电变压器不过载。

e. 高压配电变压器容量约束：

$$\sum_{i=1}^{l} E_{i,j}\sum_{k=1}^{M} F_{i,k}P_{\mathrm{mt}k}\leqslant R_{\mathrm{ht}j} \tag{18}$$

其中，$R_{\mathrm{ht}j}$ 为高压配电变压器 j 的容量，此时的容量约束不是该变压器的额定容量，而是通过输电网供电能力计算得到的该变压器所能承载的最大负荷。该约束为高压配电线路的上级电源约束。

以上所构建的高压配电网供电能力模型处理为线性规划问题，其计算流程与输电网供电能力求解

方法相似,这里不再赘述。

3　中压配电网供电能力分析

3.1　中压配电网供电能力的相关概念

中压配电系统包括中压配电变电站及其馈线所组成的网络,一般是城市电网中 10 kV 网络,10 kV 中压配电网络主要以辐射状运行,馈线多分段。

中压配电网的供电能力定义为在满足 $N-1$ 安全约束的前提下,即任意一台中压配电变压器或馈线出口故障时保证负荷的不间断连续供电,中压配电系统可以最大供应的负荷容量。$N-1$ 安全校验包含中压配电变压器 $N-1$ 校验和馈线 $N-1$ 校验,中压配电变压器 $N-1$ 校验时,无法通过高压配电线路进行负荷转供;馈线 $N-1$ 校验则选择最严重的馈线出口故障。

3.2　中压配电网供电能力计算模型

采用基于馈线互联关系的供电能力求解模型[14],以满足馈线 $N-1$ 校验和中压配电变压器 $N-1$ 校验作为约束条件,将中压配电网所能够承载的最大负荷作为目标函数,得到基于馈线互联关系的中压配电网供电能力的计算模型:

$$P''_{\mathrm{LSC}} = \max \sum_{U} P_{\mathrm{f}_u} \tag{19}$$

其中,P''_{LSC} 为中压配电系统的最大供电能力;P_{f_u} 为馈线 f_u 所带负荷;U 为所有主变的馈线集合。

约束条件如下。

a. 馈线负荷约束:

$$P_{\mathrm{f}_u} = \sum_{v} L^{\mathrm{f}}_{uv} P_{\mathrm{f}_{u,v}} \tag{20}$$

其中,$P_{\mathrm{f}_{u,v}}$ 为馈线 f_u 转移至馈线 f_v 的负荷量;L^{f}_{uv} 为馈线联络关系矩阵 $\boldsymbol{L}^{\mathrm{f}}$ 的元素,表示馈线 f_u 与馈线 f_v 之间的联络关系,如果馈线间存在联络则 $L^{\mathrm{f}}_{uv}=1$,否则 $L^{\mathrm{f}}_{uv}=0$。该约束表示馈线 f_u 所带负荷可通过馈线分段联络转带给不同的馈线,所有转带出去的负荷之和等于该馈线负荷。

b. 主变负荷约束:

$$P_{\mathrm{mt}j} = \sum_{\mathrm{f}_u \in j} P_{\mathrm{f}_u} \tag{21}$$

其中,$\mathrm{f}_u \in j$ 表示馈线 f_u 为主变 j 的所属母线。该约束表示主变 j 所带负荷等于该变压器所有馈线所带负荷之和。

c. 负荷转带约束:

$$P_{\mathrm{mt}j,k} = \sum_{\mathrm{f}_u \in j, \mathrm{f}_v \in k} L^{\mathrm{f}}_{uv} P_{\mathrm{f}_{u,v}} \tag{22}$$

其中,$P_{\mathrm{mt}j,k}$ 为中压配电变压器 j 向中压配电变压器 k 转供的负荷。该约束表示变压器 j 进行 $N-1$ 校验时转带给变压器 k 的负荷是通过两变压器间的联络馈线实现的。

d. 主变容量约束:

$$L^{\mathrm{t}}_{jk} P_{\mathrm{f}_{u,v}} + P_{\mathrm{mt}k} \leqslant R_{\mathrm{mt}k} \tag{23}$$

其中,L^{t}_{jk} 为主变联络关系矩阵 $\boldsymbol{L}^{\mathrm{t}}$ 的元素,表示中压配电变压器 j 与中压配电变压器 k 之间的联络关系,若两变压器间存在联络则 $L^{\mathrm{t}}_{jk}=1$,否则 $L^{\mathrm{t}}_{jk}=0$。

e. 馈线容量约束:

$$L^{\mathrm{f}}_{uv} P_{\mathrm{f}_{u,v}} + P_{\mathrm{f}_v} \leqslant R_{\mathrm{f}_v} \tag{24}$$

其中,R_{f_v} 为馈线 f_v 的极限联络容量。该约束表示馈线 f_v 通过其他联络馈线转供负荷后,其他馈线不发生过载。

以上中压配电网供电能力模型细化到馈线级别,能够更精确地反映出馈线容量与馈线互联关系对供电能力的约束限制。

4　城市电网综合供电能力分析

城市电网电压等级包含了输电网与配电网,输电网作为城市电网的直接供电电源,对配电网络的影响是源头性的,因此有必要在分析配电网供电能力的同时综合考虑输电网的影响。

输电网络一般是闭环运行,因此本文认为其满足 $N-1$ 安全校验,以直流潮流作为约束条件,采用线性规划的方法求取输电网络供电能力并将其作为约束条件。构建了高、中压配电网供电能力模型,对高压配电线路、中压配电变压器以及中压联络馈线在满足 $N-1$ 安全校验下的供电能力进行求解,并以其中最小值作为网络的最大供电能力。同时,由于中压配电变压器作为联络高压配电网与中压配电网的枢纽,受影响的主变可以通过高压侧配电线路进行高压转供,也可以通过站内联络开关或中压联络馈线分别实现站内转供或中压转供。最后通过分析变压器在不同转供方式下的最大供电能力结果,即可得出相应变压器在故障情况下的负荷转供方式。

5　算例分析

采用基于直流潮流的线性规划模型对城市输电部分最大供电能力求解时,算例中平衡节点的出力存在上限,因此采用等效支路法将平衡节点作为出力上限为 0 的负荷节点处理,并将平衡节点的出力限值转化为支路的容量限值,以此得到更为精确的计算结果。

本文选取某城市区域电网进行分析,其输电网络拓扑见图 2,0 号节点为发电机节点(平衡节点),其他节点均为负荷节点;配电部分包含 22 台 110 kV 变压器(编号 T1—T22)、28 条高压配电线路、78 条中压馈线。限于篇幅,详细的配电网络拓扑结构见附录中图 A1。

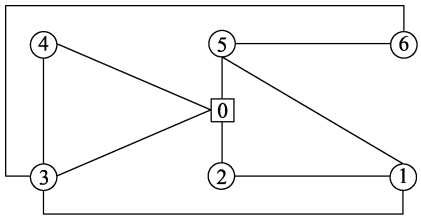


图2 输电网络结构图

Fig.2 Structure of transmission network

采用基于直流潮流的线性规划模型对城市输电网进行最大供电能力求解,其计算结果见表1。

表1 输电网各节点负荷

Table 1 Node load of transmission network

节点编号	负荷/MW	节点编号	负荷/MW
1	160.0	4	100.0
2	80.0	5	160.0
3	60.0	6	158.7

根据表1可得该区域输电系统的最大供电能力为718.7 MW,且此时求得的发电机出力为1 014.2 MW。以输电网供电能力作为上级供电约束对其配电部分供电能力进行求解,计算结果见表2,该计算结果为各电气单元满足 $N-1$ 安全校验的最大供电能力,同时反映出各变压器在满足 $N-1$ 安全校验下通过不同转供方式获得的最大供电能力。

表2 计及输电网供电能力约束的 $N-1$ 校验结果

Table 2 $N-1$ verification results considering power supply capability of transmission network

MW

校验对象	中压转供	站内转供	高压转供
T1	649.5	683.4	666.5
T2	649.5	683.4	0
T3	643.4	675.8	0
T4	643.4	675.8	649.5
T5	649.5	683.4	661.7
T6	654.7	683.4	0
T7	706.0	683.4	0
T8	703.4	683.4	0
T9	717.3	683.4	683.4
T10	706.0	683.4	683.4
T11	717.3	683.4	0
T12	717.3	683.4	0
T13	706.0	683.4	0
T14	694.7	683.4	683.4
T15	677.3	675.8	643.4
T16	677.3	675.8	0
T17	666.0	675.8	660.4
T18	643.4	675.8	660.4
T19	643.4	681.9	643.4
T20	649.5	681.9	649.5
T21	649.5	683.4	0
T22	649.5	683.4	661.7

表2结果显示,在考虑输电网供电能力约束,各电气单元均满足 $N-1$ 安全校验的情况下,城市电网最大供电能力为643.4 MW,该结果为配电网各电气单元均在满足 $N-1$ 安全校验情况下所求得最大供电能力的最小值。通过对比各变压器在不同转供方式下最大供电能力的差异可以看出,对于变压器T7—T16,在发生 $N-1$ 故障时,通过中压转供能够获得更大的供电能力;而其余变压器在发生 $N-1$ 故障时通过站内转供即可达到更高的供电能力。因此通过对该模型的计算,不但能够得到城市电网的整体供电能力,还能够为变压器在故障情况下的负荷转供方式提供参考。

同样地,在不考虑输电网对配电网供电能力约束的情况下,对配电网进行供电能力计算,结果见表3。

表3 不计输电网供电能力约束的 $N-1$ 校验结果

Table 3 $N-1$ verification results without considering power supply capability of transmission network

MW

校验对象	中压转供	站内转供	高压转供
T1	771.4	805.3	805.3
T2	771.4	805.3	0
T3	765.3	797.7	0
T4	765.3	797.7	803.8
T5	771.4	797.7	803.8
T6	765.3	797.7	0
T7	765.3	797.7	0
T8	765.3	797.7	0
T9	765.3	797.7	797.7
T10	765.3	803.8	797.7
T11	771.4	803.8	0
T12	771.4	803.8	0
T13	773.8	805.3	0
T14	782.7	805.3	805.3
T15	770.5	797.7	805.3
T16	765.3	797.7	0
T17	765.3	797.7	797.7
T18	765.3	797.7	803.8
T19	765.3	803.8	797.7
T20	771.4	803.8	803.8
T21	771.4	805.3	0
T22	771.4	805.3	805.3

由表3可以看出,在不考虑输电部分供电能力约束的情况下,城市电网最大供电能力为765.3 MW,相较于计及输电网供电能力约束的情况,城市电网的最大供电能力提升了121.9 MW。由此可以看出在以往配电网供电能力的研究中,不考虑输电网供电能力约束所得的计算结果偏高,对于网络供电能力的评估过于乐观,而并未反映真实的负荷承载能力。因此在对城市电网供电能力进行精确计算时不能忽略输电网的影响,需要考虑网络整体拓扑结构。

图3较为直观地反映了输电网供电能力约束对配电网供电能力的影响。

对比图3(a)、(b)可以发现,在考虑输电网供电能力约束的情况下,配电网各单元在满足 $N-1$ 安全校验时所求得的最大供电能力均低于750 MW,对于

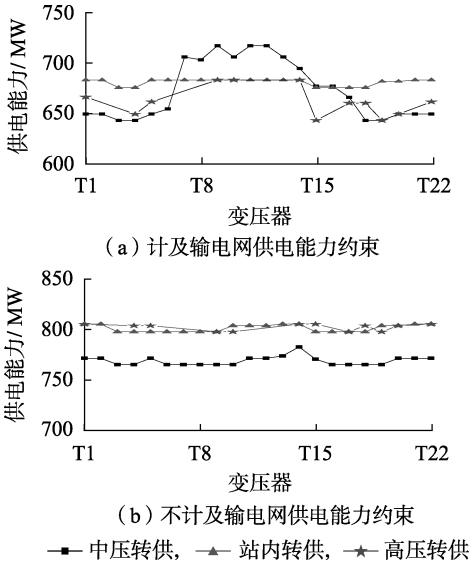


图 3　计及与不计及输电网供电能力约束的结果示意图

Fig.3　Schematic diagram of results with and without considering power supply capability of transmission network

变压器 T7—T16,相较于高压转供与站内转供方式,其中压转供能力更强;而在不计及输电部分供电能力约束的情况下,配电网各单元在满足 $N-1$ 安全校验时所求得的最大供电能力均高于 750 MW,且各变压器高压转供以及站内转供能力提升明显。可见在不计及输电网供电能力约束情况下所求得的配电网供电能力偏高,且输电网供电能力约束主要限制的是变压器的站内转供能力和高压转供能力。

6　结论

输电网和配电网是城市电网组成的主要载体,其供电能力势必受到两者的共同制约。而传统城市电网供电能力分析鲜少有从全局角度进行考虑,就此本文提出了一种基于输配全局的城市电网供电能力计算模型,其主要特点如下。

a. 计及电网拓扑的整体性,综合考虑了城市输电网与配电网对网络整体供电能力的影响。计算结果显示不计及输电网供电能力约束的情况下所求得的城市电网供电能力偏高,其评估结果过于乐观。

b. 在对中压配电变压器与中压联络馈线进行 $N-1$ 安全校验的基础上,增加了高压配电线路的 $N-1$ 校验,从而得到中压配电变压器在不同转供方式下的最大供电能力,该结果能够为变压器故障情况下的负荷转供方式提供参考。

c. 考虑到城市电网规模庞大及其联络关系的复杂性,本文模型在实际应用中可能存在计算量较大、模型复杂程度加深的问题。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 汪卫华. 现有配电模式下配网供电能力研究[J]. 电力系统保护与控制,2007,35(14):13-16.
WANG Weihua. Research on supply capability of distribution network under present distribution mode[J]. Power System Protection and Control,2007,35(14):13-16.

[2] 丘文千. 用最大最小负荷倍数评估电网供电能力[J]. 华东电力,1994(10):29-30.

[3] MIU K N,CHIANG H D. Electric distribution system load capability:problem formulation,solution algorithm,and numerical results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(1):436-442.

[4] 李欣然,刘友强,朱湘友,等. 地区中压配电网容载比的研究[J]. 电力系统保护与控制,2006,34(7):47-50.
LI Xinran,LIU Youqiang,,ZHU Xiangyou,et al. Research on capacity-load ratio in district MV distribution networks[J]. Power System Protection and Control,2006,34(7):47-50.

[5] 葛少云,董静媛,王晓东,等. 基于模糊推理的城市中压配电网供电能力评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2004,16(6):14-17.
GE Shaoyun,DONG Jingyuan,WANG Xiaodong,et al. Evaluation of power supply capability in MV distribution networks based on fuzzy reasoning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2004,16(6):14-17.

[6] LUO F,WANG C,XIAO J,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.

[7] 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 Wenzhuo,GUO Xiaodan,et al. A supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(24):47-52.

[8] 吴云亮,沈阳武,林超,等. 基于多元非线性回归模型的环型中压配电网最大供电能力评估方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):7-13.
WU Yunliang,SHEN Yangwu,LIN Chao,et al. Maximum power supply capability evaluation based on multivariate nonlinear regression model for medium-voltage loop distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):7-13.

[9] 肖峻,蒋迅,郭伟,等. 分区柔性互联城市电网的最大供电能力分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):66-73.
XIAO Jun,JIANG Xun,GUO Wei,et al. Total power-supply capability of urban power grid with flexibly-interconnected partitions[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):66-73.

[10] 黄伟,刘琦,杨舒文,等. 基于主动配电系统供电能力的安全态势感知方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):74-80.
HUANG Wei,LIU Qi,YANG Shuwen,et al. Security situation awareness based on power-supply ability model of active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):74-80.

[11] 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 Haozhong,ZHANG Xiubin,et al. Evaluation method for maximum load capability of urban medium-voltage distribution system[J]. High Voltage Engineering,2009,35(2):403-407.

[12] 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 Shaoyun,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.
[13] 肖峻,谷文卓,贡晓旭,等. 基于馈线互联关系的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):72-77.
XIAO Jun,GU Wenzhuo,GONG Xiaoxu,et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(17):72-77.
[14] 王磊,刘洪,曾平良,等. 计及高压配电线路转供约束的配电系统综合供电能力计算[J]. 电网技术,2013,37(12):3584-3589.
WANG Lei,LIU Hong,ZENG Pingliang,et al. Calculation of distribution system's comprehensive power supply capability considering load transfer constraint of high-voltage distribution lines[J]. Power System Technology,2013,37(12):3584-3589.
[15] 卢志刚,陈伟坤,张晓辉,等. 城市电网输配全局最大供电能力分析[J]. 电网技术,2015,39(6):1623-1630.
LU Zhigang,CHEN Weikun,ZHANG Xiaohui,et al. Global maximum power supply capability analysis of city power grid[J]. Power System Technology,2015,39(6):1623-1630.
[16] 张曦,刘友波,吕林,等. 计及高压配电网负荷转供的城市220 kV片区电网供电能力分析[J]. 电网技术,2017,41(5):1612-1618.
ZHANG Xi,LIU Youbo,LÜ Lin,et al. Total supply capability analysis of urban 220 kV area power system considering load transfer capability of HV distribution network[J]. Power System Technology,2017,41(5):1612-1618.
[17] 葛少云,郭明星,王成山,等. 城市高压配电网接线模式比较研究[J]. 电力自动化设备,2004,24(2):33-37.
GE Shaoyun,GUO Mingxing,WANG Chengshan,et al. Comparative study of connection modes in high-voltage distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(2):33-37.

作者简介:

孙晓艳

孙晓艳(1994—),女,山西忻州人,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划与运行(**E-mail**:1147941103@qq.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士,主要研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制、分布式发电及智能电网(**E-mail**:liujy@scu.edu.cn);

魏震波(1978—),男,四川成都人,副教授,博士后,通信作者,主要研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析与控制、电力市场(**E-mail**:weizhenbo@scu.edu.cn);

郭焱林(1992—),男,四川泸州人,硕士研究生,主要研究方向为配电网优化与运行(**E-mail**:SCUgyl@163.com);

蒋 乐(1975—),男,四川成都人,高级工程师,博士,主要研究方向为特超高压输电技术、电力系统分析(**E-mail**:445482183@qq.com)。

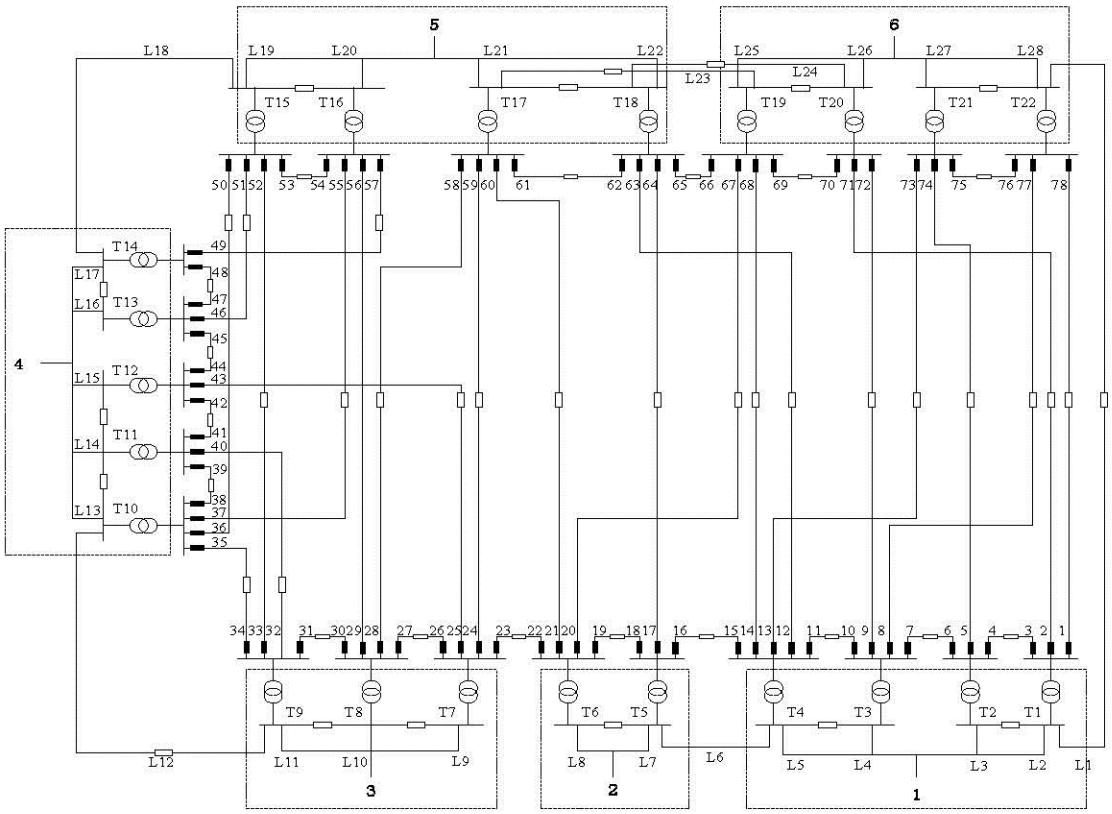
Power supply capability of urban transmission and distribution power system

SUN Xiaoyan[1],LIU Junyong[1],WEI Zhenbo[1],GUO Yanlin[1],JIANG Le[2]
(1. College of Electrical Engineering and Information Technology,Sichuan University,Chengdu 610065,China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Corporation,Chengdu 610041,China)

Abstract:An analysis model of power supply capability for urban transmission and distribution power grid is proposed. The power supply capability of transmission network in urban power grid is solved with the liner programming model based on direct current power flow,and is taken as the system upper constraint. The traditional distribution model is refined to the medium voltage feeder,and the power supply capability models of high and medium voltage distribution network are established respectively. The maximum power supply capabilities of high voltage distribution lines,medium voltage distribution transformers and medium voltage distribution lines are calculated under different transfer modes under the $N-1$ safety constraints,the minimum value of which is selected as the maximum power supply capability of the system. The case results show that the proposed method can effectively quantify the influence of transmission network on the power supply capability of urban power grid,and the load transfer mode in the case of transformer failure can be intuitively selected according to the difference of power supply capability under different transfer modes,and the validity of the proposed model is verified.

Key words:power supply capability;urban power grid;$N-1$ safety constraints;load transfer

附录：



图A1 配电网络结构图

Fig.A1 Structure of distribution network