

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210299

# 变电站动态负载安全裕度评估及负荷控制方法

黄文韬<sup>1</sup>, 张波<sup>2</sup>, 王建<sup>2</sup>, 张璞<sup>1</sup>, 姚江宁<sup>2</sup>, 陈鸿昆<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限公司广州供电局, 广东 广州 510620;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 为研究变电站在检修或故障情况下的负载安全裕度, 提出一种计及设备动态容量的变电站负载能力计算模型及负荷控制方法。首先, 根据负载导则和温升限值构建变电站主设备的动态载流能力计算模型, 得到设备的动态容量。其次, 考虑站内和站间转供, 运用最大流方法, 确定变电站系统和各母线段负荷点在当前拓扑接线方式下的供电能力, 进而依据当前负荷水平求出负荷安全裕度或超额负荷量。然后, 依据负荷情况确定相应负荷控制方法, 对不满足供电要求的情况根据负荷优先级确保供电, 切除过载的负荷量以保证系统安全运行。最后, 算例证明所提方法可以针对各类停运情况提出相应的负荷转供或负荷切除策略, 在保证主设备安全的前提下充分挖掘变电站系统的供电能力, 提升供电可靠性。

**关键词:** 变电站; 动态载流能力; 最大供电能力; 安全裕度; 负荷控制

## Dynamic load safety margin evaluation and load control methods for a power substation

HUANG Wentao<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, ZHANG Pu<sup>1</sup>, YAO Jiangning<sup>2</sup>, CHEN Hongkun<sup>1</sup>, XIONG Xiaofu<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To study the load safety margin of a power substation under maintenance or fault, a calculation model of the load capacity of the substation and a load control method considering the dynamic capacity of the equipment are proposed. First, a dynamic current-carrying capacity calculation model of the main equipment of the power substation is established according to the loading guide and temperature rise limitation. This helps obtain the dynamic capacity of the equipment. Second, the power supply capacities of the substation system and each busbar load point in its recent topology connection mode are determined by adopting the maximum flow method and considering the load transfer within and between the power substations. Then the load safety margin or overload amount are determined according to the current load level. Third, the corresponding load control method is taken according to the load situation, so as to ensure the power supply relying on the load priority when the power supply requirements are not met. The excess load is removed to guarantee the safe and stable operation of the system. Finally, the case study shows that the proposed method can put forward the corresponding load transfer or load removal strategies for various outages, and fully excavate the power supply capacity of the substation system and improve the power supply reliability at the same time as ensuring the safety of the main equipment.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China-State Grid Joint Fund for Smart Grid (No. U1866603) and the Science and Technology Project of Guangzhou Power Supply Bureau "Research on Power Substation Operation and Maintenance Risk Assessment Method and Visual System" (No. GZHKJXM 20170083).

**Key words:** power substation; dynamic current carrying capacity; maximum power supply capacity; safety margin; load control

## 0 引言

变电站作为电力系统中电能汇集和分配的关键

环节, 其主要功能是向终端用户分配电能。降压变电站的供电能力是衡量变电站性能的主要指标, 科学评估变电站的供电能力对电力系统的安全可靠运行至关重要。

近年来有较多学者研究配电网的供电能力。文献[1]通过过载比法来计算配电网的供电能力, 该方法计算简单, 但没有考虑实际网络, 忽略了负荷转

基金项目: 国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助(U1866603); 广州供电局科技项目资助“变电站运维风险评估方法及可视化系统研究”(GZHKJXM 20170083)

供对供电能力的影响。文献[2]考虑了主变互联对供电能力的影响,但没有精确到实际联络线容量约束,结果存在误差。文献[3]考虑了主变压器的短时过载和联络线的容量限制。文献[4]从充分挖掘配电网供电能力的角度,探索馈线联络对最大供电能力的作用机理。文献[5-7]计及  $N-1$  安全准则,提出了配电网最大供电能力(Total Supply Capability, TSC)的概念、模型和指标方法。文献[8]提出一种考虑配电网馈线和主变容量约束、运行约束以及负荷转移约束的主变  $N-1$  安全校验方法。文献[9]提出了考虑可靠性柔性需求与故障后负荷响应的主动配电网供电能力评估方法。文献[10]提出了  $N-0$  安全的城市配电网安全域模型和供电能力模型。

配电网供电能力需要计及网络供电转移能力,配电网与流量网络有很好的对应关系,采用最大流(Maximum Flow, MF)方法计算配电网的供电能力更加简单、高效。文献[11]提出一种网络最大流的标号算法;文献[12]对最大流计算过程中画网络图问题进行改进,避免了标号过程,直观性强;在此基础上,文献[13]提出一种基于宽度优先的网络最大流求解算法,该算法减少了重复寻找增广链的标号过程,提高了求解网络最大流的执行效率。

变电站的负载能力受变压器容量与联络开关容量影响较大,现有文献较少考虑主变过载因素,文献[2,14]虽考虑主变短时过载,却只是简单设置过载系数,没有考虑过载状态的影响因素。

另一方面,对于计及  $N-1$  安全准则的配电系统供电能力计算,目前要求系统在任意时刻硬性满足  $N-1$  校验要求。但在实际电网运行中,尖峰负荷和均值负荷差距较大,依此原则评估得到的系统的供电能力将具有很大裕度;不同  $N-1$  情形下(故障或检修)系统的供电能力也会有很大差别,只评估满足  $N-1$  安全准则下的变电站系统的负载能力不能充分利用系统的供电资源,不利于优化资源配置,提高供电设备利用率。

鉴于此,本文提出一种基于设备动态载流能力的变电站负载安全裕度评估方法及负荷控制策略。通过考虑变压器、开关设备、线路的动态容量,根据实时负荷,利用最大流方法,分别计算具体  $N-1$  情形下变电站与负荷点的负载能力,求出负载安全裕度。对超出负载能力的情形,提出相应负荷控制措施,按负荷优先级切除次要负荷,保证对重要负荷供电。该方法能有效计算变电站系统在  $N-1$  情形下的最大负载能力,结合负荷预测,方便相关部门对紧急情况提前采取应对措施,确保供电安全。最后,通过算例验证了本文方法的正确性和有效性。

## 1 主设备动态载流能力计算方法

电力设备的负载能力不仅关系到设备本身的安全性,而且还影响电力系统的安全性。设备的负载能力是指其能够维持本身正常寿命而在某一段时间内所允许承担的最大负载,与设备运行年限和温升限值有关,是制约变电站负载能力的主要因素。用动态载流量表示设备的连续过载承受能力,基于稳态热平衡方程,根据最高允许温度和天气条件,可计算出动态载流量<sup>[15]</sup>。

电气主接线中承载一次电流的电力设备主要包括输电线路、母线、变压器、开关设备和电流互感器。其中,母线、开关设备和电流互感器在设备选型时留有较大裕度,且它们的最高允许运行温度高于输电线路,所以,它们承受过负荷的能力一般远高于线路和变压器。因此,本文着重分析变压器、开关设备和线路的过载能力。

### 1.1 变压器

计算变压器动态载流量需先计算变压器的热点温度,其大小决定了变压器动态载流量的大小。本文使用热路模型法对油浸式电力变压器的热点温度进行建模,先用油-空气模型对变压器顶层油温进行计算,再利用绕组-油模型对变压器绕组的热点温度进行计算。

变压器的油-空气模型中,顶层油温的计算方式如式(1)所示<sup>[16]</sup>。

$$\frac{K^2 \beta + 1}{\beta + 1} \cdot [\Delta\theta_{oilR}]^{1/n} = \tau_{oil} \frac{d\theta_{oil}}{dt} + [\theta_{oil} - \theta_a]^{1/n} \quad (1)$$

式中: $\Delta\theta_{oilR}$ 为额定负载下变压器顶层油温相对环境温度的稳态温升,°C; $\theta_{oil}$ 为顶层油温,°C; $\theta_a$ 为空气温度,°C; $K$ 为负载系数,表示当前电流与额定电流的比值; $\tau_{oil}$ 表示油时间常数; $\beta$ 为额定负载下负载损耗与空载损耗的比值; $n$ 为非线性指数,采用 ONAF(Oil Natural Air Forced)冷却模式的中大型变压器取值 0.9。

在绕组-油模型中,绕组的周围环境为油,顶层油温由油-空气模型计算而来并作为“环境温度”。由于是逆推最大允许负载系数,因此可认为油温决定热点温度。热点温度的计算方式如式(2)所示。

$$K^2 \cdot [\Delta\theta_{hstR}]^{1/m} = \tau_{wnd} \frac{d\theta_{hst}}{dt} + [\theta_{hst} - \theta_{oil}]^{1/m} \quad (2)$$

式中: $\Delta\theta_{hstR}$ 为额定负载下变压器热点温度相对顶层油温的稳态温升,°C; $\theta_{hst}$ 为变压器热点温度,°C; $\tau_{wnd}$ 表示绕组时间常数; $m$ 为非线性指数,采用 ONAF 冷却模式的中大型变压器取值 0.8。

变压器的连续过载能力可以在保障变压器安全的前提下, 充分挖掘其负载潜力, 提升负载能力。变压器长期运行允许电流的负载系数以变压器承载正常周期性负载的热点温度限值为计算条件, 基于实时气象环境温度, 结合变压器的稳态热平衡方程计算。具体求解的方程组<sup>[17]</sup>如式(3)所示。

$$\begin{cases} \theta_{oil} = \left( \frac{K_{cl}^2 \beta + 1}{\beta + 1} \right)^n \Delta \theta_{oilR} + \theta_a \\ K_{cl} = \left( \frac{\theta_{hst,max} - \theta_{oil}}{\Delta \theta_{hstR}} \right)^{\frac{1}{2m}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\theta_{hst,max}$  为变压器承载正常周期性负载的热点温度限值, 对于中大型变压器,  $\theta_{hst,max}$  可取 120 °C;  $K_{cl}$  为温度限制下变压器长期运行电流的负载系数, 与额定电流相乘即为变压器的动态载流量。

当气温  $\theta_a$  已知时, 可采用二分法对式(3)进行计算, 得到变压器的动态载流量。

## 1.2 开关设备

开关设备包括断路器和隔离刀闸, 规程 GB/T 11022-2011 《高压开关设备和控制设备标准的共同技术要求》规定了开关设备在运行气象条件改变引起的连续过载能力, 只要所有部件温升不超过规定的限值, 在较低的周围环境下可以承受不高于额定电流 2 倍的过载电流。具体数值需要基于温升、热时间常数、实际电流、实际周围环境温度, 通过温升试验计算确定。在实际的环境温度  $T_a$  下, 开关设备允许的连续负载电流  $I_{cs}$  可用式(4)计算<sup>[18]</sup>。

$$I_{cs} = I_r \left( \frac{\theta_{max} - \theta_a}{\theta_r} \right)^{\frac{1}{1.8}} \quad (4)$$

式中:  $I_r$  为额定电流, A;  $\theta_{max}$  为开关设备允许的最高热点温度 ( $\theta_{max} = \theta_r + 40$ ), °C;  $\theta_r$  为额定电流下开关设备允许的最大温升, °C。

计算时需要根据开关设备的设计特点选取合适的  $\theta_{max}$  和  $\theta_r$ , 开关设备的主要部件有不同的温度限制, 具体可查阅 IEC 62271-1:2007 的表 3。  $\theta_{max}$  和  $\theta_r$  的值按照以下准则确定:

(1) 如果实际的环境温度小于 40 °C, 选取规定有最高温度限制的部件的  $\theta_{max}$  和  $\theta_r$ 。

(2) 如果实际的环境温度大于 40 °C, 选取规定有最低温度限制的部件的  $\theta_{max}$  和  $\theta_r$ 。

使用这些参数值计算的连续负载电流的结果, 不会引起开关设备其他部位超过允许的温度限值。

## 1.3 输电线路

架空线路的最大载流能力不仅受其参数的影

响, 而且还受环境温度、风速风向、太阳辐射和其他天气条件的影响。参考文献[15]的热平衡方程, 输电线路的连续负载电流  $I_{cc}$  计算如式(5)所示。

$$I_{cc} = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(\theta_{c,max})}} \quad (5)$$

式中:  $q_c$ 、 $q_r$ 、 $q_s$  为线路单位长度的对流散热功率、辐射散热功率和日照吸热功率;  $R(\theta_{c,max})$  为导线温度为  $\theta_{c,max}$  时的交流电阻。

## 2 负载安全裕度评估与负荷控制策略

### 2.1 变电站的负载能力

变电站的负载能力, 是指变电站系统在满足约束条件下所能提供的最大负荷, 用容量来表征, 单位为 MVA, 由变电站内变压器、开关、线路容量和系统运行方式决定<sup>[19-20]</sup>。变电站的负载能力不涉及复杂的暂态稳定问题, 只涉及稳态问题<sup>[21]</sup>, 其核心是通过网络进行供电和  $N-1$  后的转供问题。变电站系统线路较短, 电压偏移及功率损耗较小, 容量约束比电压约束更严格。本文主要考虑网络结构、联络关系和容量等因素, 不进行潮流计算<sup>[22]</sup>。

“ $N-1$ ”安全准则是电力系统规划和运行的基本准则, 根据《城市电力网规划设计导则》<sup>[23]</sup>,  $N-1$  准则是指配电网在网络常态工况下, 一个元件发生意外故障或设备事故冲击时, 配电网及其他元件的安全稳定运行状态不被破坏, 仍能保持正常供电而不损失负荷。

由于实际电网运行中以  $N-1$  准则约束下评估得到的系统的供电能力将具有很大裕度, 不同  $N-1$  情形下系统的供电能力也会有很大差别, 只评估满足  $N-1$  安全准则下的变电站系统的负载能力相对保守。为了充分利用系统的供电资源, 在考虑设备动态容量的基础上, 本文从母线段负荷点和变电站系统两个方面出发, 计及网络转供能力, 对具体  $N-1$  情形下的变电站供电能力进行评估。

(1) 母线段负荷点的供电能力评估: 对发生检修或故障的变电站, 考虑转供情况, 计算该站母线(段)出线负荷的负载能力大小;

(2) 变电站系统的供电能力评估: 即发生  $N-1$  检修或故障后, 根据当前网络结构, 计及站内转供和站间转供, 计算变电站系统的最大供电能力。

当变电站发生  $N-1$  检修情形时, 根据当前负荷水平考虑内部转供能力, 将站内转供、站间转供作为负荷控制措施, 再计算变电站的供电能力。发生  $N-1$  故障时, 优先考虑站内转供, 将多余负荷转供给同站主变; 不能满足时再考虑通过站间转供, 最

大限度确保供电需求；如果负荷水平超出了整个系统的供电极限，供电不能满足负荷需要，此时需要采取切负荷措施，包括站内转供、站间转供和切除负荷三类，具体措施及要求在 2.3 节详细介绍。

## 2.2 基于最大流方法的负载安全裕度评估

变电站系统与流量网络在概念上具有很好的对应关系，变电站的正常运行约束就是网络流的容量约束，最大负载能力对应网络中的最大允许流通容量<sup>[24]</sup>。因此，本文将变电站系统等效为流量网络，采用有向图模型描述站间联络关系<sup>[25]</sup>，运用最大流方法计算变电站的负载能力，得到变电站和负荷点的安全裕度，并依此确定负荷控制策略，确保系统供电安全可靠。

### 2.2.1 最大流方法

网络最大流是网络中最大允许流通流量的网络流<sup>[26]</sup>，它涉及图论与运筹学的知识，目的是计算在有容量限制的网络中所能传输的最大容量。本文基于宽度优先网络最大流求解算法，将变电站系统拓扑结构等效为网络结构，以此得到网络传输的最大容量。

定义一个容量网络  $G = (V, A, C)$ ， $G$  为连通赋权的有向图， $V$  代表节点集， $A$  是有向边(弧)集， $C$  是弧上的容量大小。 $f_{st}$  为容量网络中从始点  $S$  到终点  $T$  的流，线性规划模型<sup>[13]</sup>如下：

$$\sum_j f(i, j) - \sum_j f(j, i) = \begin{cases} f_{st}, i = S \\ 0, i \neq S, T \\ -f_{st}, i = T \end{cases} \quad (6)$$

$$0 \leq f(i, j) \leq C(i, j), \forall (i, j) \in A(G)$$

式中： $f_{st}$  是网络  $G$  的一个可行流； $C(i, j)$  为弧  $(v_i, v_j)$  上的容量上限，在所有满足条件的可行流中，流量最大的可行流  $f_{\max}$  称为最大流。式(6)中， $f(i, j) = C(i, j)$  的弧为饱和弧， $f(i, j) < C(i, j)$  的弧为非饱和弧。

定义剩余容量网络  $U(f) = (V, A(f), C(f))$ ，由含可行流的容量网络图中所有非饱和弧及所有节点组成，用反向弧在网络中标记出饱和弧和当前流，满足两个关系：

(1)  $(i, j) \in A(G)$ ，若  $f(i, j) < C(i, j)$ ，则  $CU(i, j) = C(i, j) - f(i, j)$ ；

(2)  $(i, j) \in A(G)$ ，若  $f(i, j) > 0$ ，则  $CU(j, i) = f(i, j)$ 。

其中， $CG(i, j)$  为原网络  $G$  中弧  $(v_i, v_j)$  的容量， $CU(i, j)$  为剩余网络  $U$  中弧  $(v_i, v_j)$  的容量。因此，最大流算法步骤如下所述。

初始化：在容量网络  $G = (V, A, C)$  中，取任意

一个可行流开始，一般取零流。

第一步：从始点  $v_S$  出发，利用宽度优先原则，找一条从始点  $v_S$  到终点  $v_T$  包含剩余容量最大的弧的最短增广链  $P$ 。如果不存在，结束， $f$  就是  $G$  的最大流。

第二步：求出该最短增广链  $P$  上各弧容量的最小值。删除饱和弧，并在最短增广链  $P$  的各弧上减去最小值。

第三步：修复增广链  $P$ ，转第二步；如果不能修复，则转第一步。

直到在剩余容量网络中，找不到包含剩余容量最大的弧的最短增广链时，计算结束。

### 2.2.2 不同 $N-1$ 情形下的负载安全裕度

运用最大流方法对变电站进行供电能力评估，在得到最大供电能力的基础上，根据负荷水平将负荷分为三类，分别计算负荷点的负载安全裕度。

第一类：各母线段的负荷均未超过各变电站主变容量，满足供电需求，无需转供和切除负荷，计算各母线段负荷点的安全裕度。

第二类：包括未超过主变容量和超过主变容量两种负荷。首先，挑出超过主变容量的负荷  $A$ ，将其负荷流设置为零，剩余负荷点按负荷容量设置可行流，利用最大流方法计算得到其流量网络  $G_1$ ，接着用原始网络  $G$  减去  $G_1$  得到剩余流量网络  $G_2$ ，再运用最大流方法计算网络  $G_2$ ，得到流量网络  $G_3$ ，根据  $G_3$  确定负荷点  $A$  的最大负荷量；与现有工作点的负荷对比，大于现有负荷代表满足供电，无需切除，小于现有负荷则不能满足供电需求，需要切除负荷。

第三类：各母线段负载全部超过各自主变容量，已经无法转供，根据各自容量差额切除相应负荷。

综上，变电站动态负载安全裕度评估流程如图 1 所示。

## 2.3 负荷控制策略

如表 1 所示，本文所提负荷控制策略包括：站内转供、站间转供、切负荷三种控制措施，分布在两个环节。在变电站负载安全裕度评估时，先根据负荷大小情况，考虑站内转供、站间转供措施计算变电站系统的供电能力，再根据负载安全裕度结果，对裕度为负的情况结合负荷重要度采取切负荷措施。考虑负荷线路供电的优先级，切除线路负荷量总和不小于需切除负荷容量，确定需要切除的负荷线路。

不同于按综合指标对供电分区进行评价<sup>[27]</sup>，本文按负荷重要度大小对其赋予权重，以此确定变电站负荷线路的优先级。

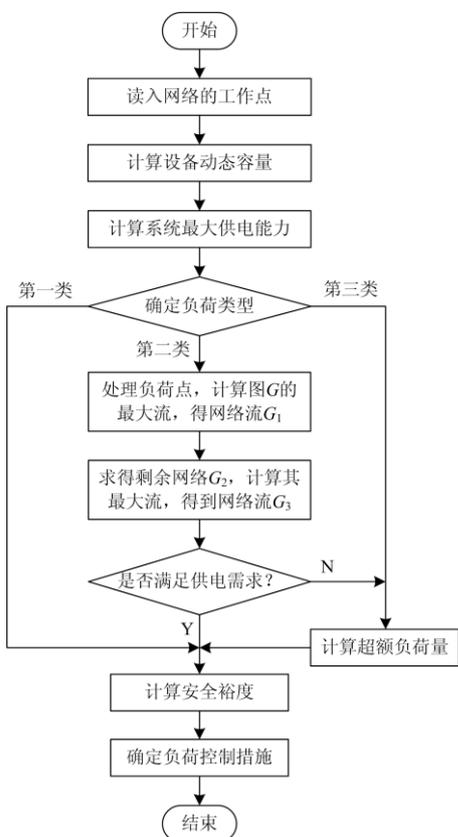


图1 变电站动态负载安全裕度评估流程图  
Fig. 1 Flow chart of dynamic load safety margin evaluation of power substation

表1 负荷控制策略

Table 1 Load control strategy

负荷控制措施	站内转供	站间转供	切除负荷
情况	单个变压器不能满足各自负荷需求	母线段负荷超出同站主变总容量	负载安全裕度为负

如图2所示, 变电站的低压母线出线端有多条负荷线路  $L_1-L_k$ , 每条线路有多个负荷点, 按供电可靠性要求将电力负荷分为三个等级, 按照电力负荷等级划分标准<sup>[28]</sup>, 根据对供电可靠性的要求及中断供电在政治、经济上所造成损失或影响的程度, 参考文献<sup>[29]</sup>对负荷区的权重定义方法, 将负荷划分为一级负荷、二级负荷和三级负荷, 其权重系数分别为 10、3、0.1。结合负荷量与负荷点权重, 计算各负荷线路的综合负荷量  $\lambda_k$ 。

$$\lambda_k = \sum_{i=1}^M \omega_i P_{ki} \quad (7)$$

式中:  $M$  为负荷线路  $L_k$  下的负荷节点数;  $\omega_i$  为第  $i$  个节点负荷的权重, 表示该负荷的重要程度级别;  $P_{ki}$  为负荷线路下第  $i$  个节点的负荷功率。根据式(7)

求得变电站各负荷馈线的综合负荷量, 将  $k$  条线路综合负荷量  $\lambda$  按大小进行排序, 便可得到各负荷线路的重要程度与供电的优先级,  $k$  条负荷线路中, 负荷量大的优先供电。

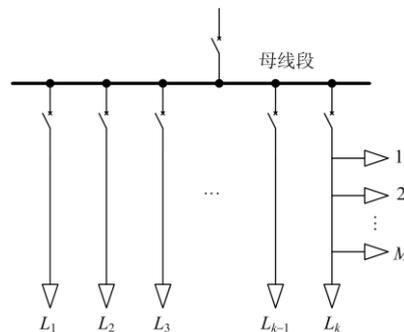


图2 母线段的负荷馈线  
Fig. 2 Load feeders connected to busbar

### 3 算例分析

本文选择图3所示某 110 kV/10 kV 降压变电站作为算例, 该系统包含两座 110 kV 变电站 S1、S2, 变压器 4 台 T1—T4, 联络开关设备 1~5(由于线路和变压器的开关容量均较大, 本文将其归入线路和变压器所在边), 负荷端为母线段 I、母线段 II。先根据设备型号、温度等条件计算主设备的动态载流能力, 再运用最大流方法结合设备动态负载能力, 算出变电站系统网络在  $N-1$  情形下的最大负载能力, 得到负载安全裕度, 确定负荷控制策略。

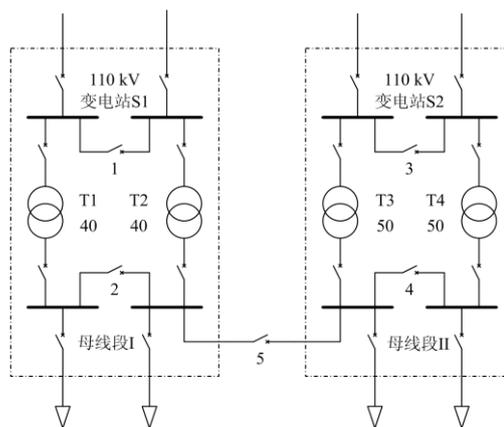


图3 算例系统的接线图  
Fig. 3 One-line diagram of the study system

#### 3.1 计算设备的动态负载能力

变电站内变压器、断路器隔离开关等基础参数如表2—表4所示。

选择某日 24 h 内的气温作为计算条件, 见图4所示。

由于高压侧断路器和隔离开关的额定电流较变

压器高压侧额定电流大 2 倍多, 因此在计算动态负载能力时可忽略高压侧的开关设备。仅计算变压器 (T1—T4)、低压侧断路器(QF-LV)、低压侧隔离开关

(QS-LV)在 24 h 内的载流能力大小, 结果如图 5 所示。由图 5 可见, 变电站主设备的动态负载能力受环境温度影响, 拥有一致的变化趋势。

表 2 变压器参数

Table 2 Transformer parameters

变压器	变压器型号	冷却方式	$\beta$	$\Delta\theta_{oilR}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\theta_{hstR}/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{hst,max}/^{\circ}\text{C}$	$n$	$m$
T1	SFZ8-40000/110	ONAF	3.9	52	26	120	0.9	0.8
T2	SFZ8-40000/110	ONAF	3.9	52	26	120	0.9	0.8
T3	SFZ8-50000/110	ONAF	3.9	52	26	120	0.9	0.8
T4	SFZ9-50000/110(H3)	ONAF	4.22	52	26	120	0.9	0.8

表 3 断路器参数

Table 3 Circuit breaker parameters

断路器型号	额定电流/A	$\theta_{max}/^{\circ}\text{C}$	$\theta_r/^{\circ}\text{C}$
高压侧 3AP1FG	3 150	115	75
低压侧 VD41231-40	3 150	115	75

表 4 隔离开关参数

Table 4 Isolation switch parameters

隔离开关型号	额定电流/A	$\theta_{max}/^{\circ}\text{C}$	$\theta_r/^{\circ}\text{C}$
高压侧 CR12-MH25	630	115	75
低压侧 GL-3150/3J	3 150	115	75

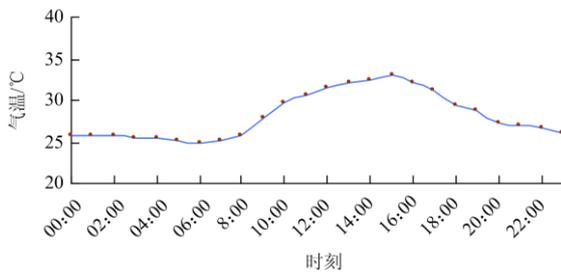


图 4 某日 24 h 气温曲线

Fig. 4 The 24-hour temperature curve on a certain day

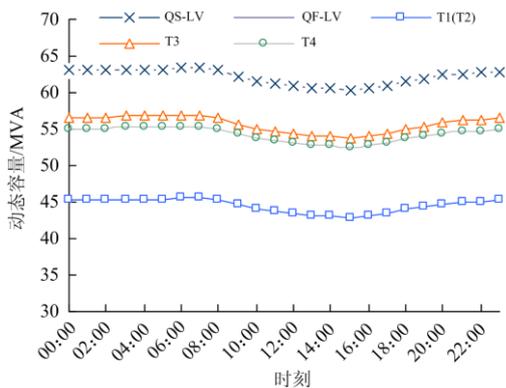


图 5 变电站主设备动态载流大小

Fig. 5 Dynamic current-carrying capacity of the main equipment of the substation

### 3.2 变电站安全裕度及负荷控制

在得到设备动态载流能力的基础上, 计算变电站在发生单一停运情况下的最大传输能力, 根据负荷水平确定负载安全裕度, 结合负荷权重系数与负荷量确定各负荷的优先级, 在供电不足情况下按供电优先级切除优先级靠后的负荷。

图 6 为设备在额定状态下运用最大流算法计算供电能力所得到的系统网络流。

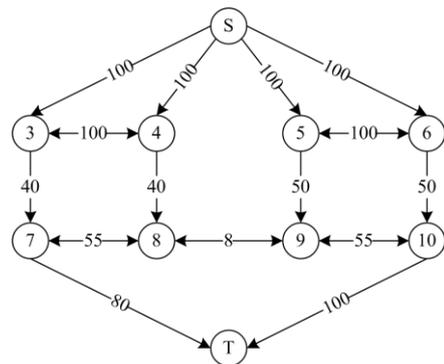


图 6 变电站网络流

Fig. 6 Network flow of power substation

将  $N-1$  停运分为变压器停运、110 kV 母线联络开关、10 kV 联络线路停运三种情况, 根据设备动态负载容量, 运用最大流方法求出不同  $N-1$  情形下的系统最大供电能力和安全裕度, 并确定相应的负荷控制措施, 结果如表 5—表 7 所示。对比可见, 在各类  $N-1$  情形中, 变电站系统受变压器停运影响较大, 其他线路断开情况对负荷供电影响较小。

如图 7 所示, 母线段 I 包含 7 条负荷线路。对于供电不足的情况, 通过每条线路中所含负荷等级与负荷量, 算出 7 条负荷线路各自的综合负荷量, 得到负荷线路的优先级见表 8, 根据负载安全裕度, 确定需要切除的负荷线路, 如表 9 所示。

在表 10 中列出未考虑动态载流、负荷控制时需要切除负荷的情况。对比表 9 与表 10 可以看出, 通过计及设备动态负载能力、考虑负荷转供等措施,

能提高变电站系统的供电能力及负载安全裕度; 在发生 N-1 情形时, 通过主设备短时间超铭牌运行、站间转供来增加供电输出, 缓解供电压力, 提高系

统供电的可靠性, 对过载运行情况结合供电优先级采取切负荷措施, 确保供电安全性, 最大程度减少故障造成的损失。

表 5 变压器 T1 停运时变电站 24 h 供电能力及负荷控制措施

Table 5 The 24-hour power supply capacity and load control measures of the power substation under transformer T1 outage

时间	母线段 I/	母线段 II/	T1 或 T2/	T3/MVA	T4/MVA	系统供电能	母线段 I 负载	母线段 I 安全	负荷控制措施
	MVA	MVA	MVA						
0:00	28	35	45.31	56.64	56.59	158.54	53.31	25.31	站内转供
1:00	28	35	45.31	56.64	56.59	158.54	53.31	25.31	站内转供
2:00	28	35	45.35	56.69	56.64	158.68	53.35	25.35	站内转供
3:00	28	35	45.39	56.74	56.74	158.87	53.39	25.39	站内转供
4:00	29	37	45.47	56.84	56.74	159.04	53.47	24.47	站内转供
5:00	30	38	45.47	56.84	56.79	159.09	53.47	23.47	站内转供
6:00	30	38	45.55	56.93	56.88	159.37	53.55	23.55	站内转供
7:00	42	53	45.51	56.88	56.84	159.23	53.51	11.51	站内转供
8:00	40	50	45.35	56.69	56.64	158.68	53.35	13.35	站内转供
9:00	48	60	44.61	55.76	55.76	156.13	52.61	4.61	站间转供
10:00	60	75	44.06	55.08	54.98	154.12	52.06	-7.94	切负荷 7.94
11:00	58	73	43.79	54.74	54.69	153.21	51.79	-6.21	切负荷 6.21
12:00	54	68	43.52	54.39	54.30	152.21	51.52	-2.48	切负荷 2.48
13:00	50	63	43.28	54.10	54.05	151.44	51.28	1.28	站间转供
14:00	55	69	43.24	54.05	54.00	151.30	51.24	-3.76	切负荷 3.76
15:00	54	68	42.97	53.71	53.71	150.39	50.97	-3.03	切负荷 3.03
16:00	52	65	43.28	54.10	54.05	151.44	51.28	-0.72	切负荷 0.72
17:00	57	71	43.59	54.49	54.39	152.48	51.59	-5.41	切负荷 5.41
18:00	56	70	44.14	55.18	55.13	154.44	52.14	-3.86	切负荷 3.86
19:00	54	68	44.38	55.47	55.37	155.21	52.38	-1.63	切负荷 1.63
20:00	50	63	44.84	56.05	55.96	156.86	52.84	2.84	站间转供
21:00	46	58	44.92	56.15	56.15	157.23	52.92	6.92	站间转供
22:00	35	44	45.08	56.35	56.25	157.68	53.08	18.08	站内转供
23:00	32	40	45.20	56.49	56.45	158.13	53.20	21.20	站内转供

表 6 110 kV 联络开关 1 停运时安全裕度与负荷控制措施

Table 6 Safety margin and load control measures when 110 kV interconnect switch 1 is outage

时间	母线段 I/	母线段 II/	T1 或 T2/	T3/MVA	T4/MVA	系统供电	安全裕度/MVA		负荷控制
							能力/MVA	母线段 I	
5:00	30	40	45.47	56.84	56.79	159.09	60.94	73.62	—
6:00	30	40	45.55	56.93	56.88	159.37	61.09	73.82	—
7:00	42	53	45.51	56.88	56.84	159.23	49.02	60.72	—
8:00	40	50	45.35	56.69	56.64	158.68	50.70	63.33	—
9:00	48	60	44.61	55.76	55.76	156.13	41.22	51.52	—
10:00	60	80	44.06	55.08	54.98	154.12	28.13	30.06	—
11:00	58	76	43.79	54.74	54.69	153.21	29.58	33.42	—

表 7 联络线 L5 停运时安全裕度与负荷控制措施

Table 7 Safety margin and load control measures when interconnected line 5 is outage

时间	母线段 I/	母线段 II/	T1 或 T2/	T3/MVA	T4/MVA	系统供电能力/	安全裕度/MVA		负荷控制
							MVA	母线段 I	
5:00	30	40	45.47	56.84	56.79	159.09	60.94	73.62	—
6:00	30	40	45.55	56.93	56.88	159.37	61.09	73.82	—
7:00	42	53	45.51	56.88	56.84	159.23	49.02	60.72	—
8:00	40	50	45.35	56.69	56.64	158.68	50.70	63.33	—
9:00	48	60	44.61	55.76	55.76	156.13	41.22	51.52	—
10:00	60	80	44.06	55.08	54.98	154.12	28.13	30.06	—
11:00	58	76	43.79	54.74	54.69	153.21	29.58	33.42	—

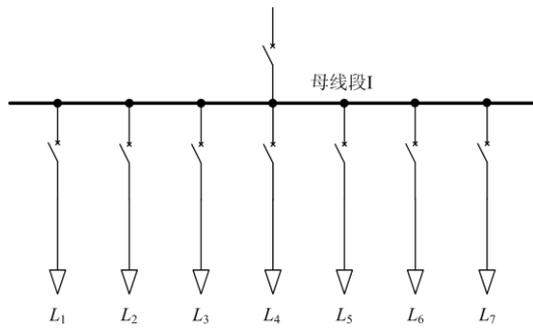


图 7 母线段 I 负荷线路情况

Fig. 7 Load feeders connected to busbar section I

表 8 母线段 I 各线路优先级

Table 8 Priority of load feeders on bus section I

线路	综合负荷量/MVA	优先级
L1	4.4	5
L2	23.7	3
L3	30.62	2
L4	0.8	7
L5	11.28	4
L6	33	1
L7	3.63	6

表 9 变压器 T1 停运导致供电能力不足切除负荷情况

Table 9 Insufficient power supply capacity and load removal due to transformer T1 outage

时间	系统供电能力/MVA	切负荷容量/MVA	切除线路
10:00	154.12	7.94	L4、L7
11:00	153.21	6.21	L4、L7
12:00	152.21	2.48	L4
14:00	151.30	3.76	L4
15:00	150.39	3.03	L4
16:00	151.44	0.72	L4
17:00	152.48	5.41	L4
18:00	154.44	3.86	L4
19:00	155.21	1.63	L4

表 10 未考虑动态负载能力和负荷转供时需要切除负荷情况

Table 10 Load removal amount without considering dynamic loading capacity and load transfer control conditions

时间	未考虑设备动态负载能力		未考虑负荷转供策略	
	系统供电能力/MVA	切负荷容量/MVA	系统供电能力/MVA	切负荷容量/MVA
10:00	150	12	154.12	15.94
11:00	150	10	153.21	14.21
12:00	150	6	152.21	10.48
14:00	150	7	151.30	11.76
15:00	150	6	150.39	11.03
16:00	150	4	151.44	8.72
17:00	150	9	152.48	13.41
18:00	150	8	154.44	11.86
19:00	150	6	155.21	9.63

## 4 结论

本文针对现有配电网供电能力评估中未考虑主设备动态负载能力情况，提出一种计及设备动态容量的变电站负载能力计算模型及负荷控制方法。根据主设备动态载流能力模型，计算设备的动态负载容量，考虑主设备短时过载运行和站内、站间转供情况，对变电站系统的供电能力进行评估，计算具体 N-1 情形下的负载安全裕度，解决了传统 N-1 准则下的供电能力评估中存在安全裕度过大、不同 N-1 情形下供电能力与安全裕度差别较大的问题。根据评估结果采取相应负荷控制措施，保证系统运行的安全稳定，结合负荷重要度确定切负荷线路，保证重要负荷的供电。算例表明，通过考虑设备的动态负载能力和转供措施，能一定程度提高系统在重要负荷运行时的供电能力。所提方法对指导变电站系统的负荷转供、采取有针对性的负荷控制措施来确保系统安全稳定运行具有一定的指导作用。

在现有研究的基础上，后续将考虑分布式电源对系统供电能力的影响，将其纳入配电网的规划设计或者作为负荷控制策略，进一步提高配电网的负载能力和运行可靠性。

## 参考文献

- [1] 李欣然, 刘友强, 朱湘友, 等. 地区中压配电网容载比的研究[J]. 继电器, 2006, 34(7): 47-50.  
LI Xinran, LIU Youqiang, ZHU Xiangyou, et al. Research on the capacity-load ratio of regional medium-voltage distribution networks[J]. Relay, 2006, 34(7): 47-50.
- [2] 王成山, 罗凤章, 肖峻, 等. 基于主变互联系数的配电网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 Chengshan, LUO Fengzhang, XIAO Jun, et al. Power distribution system power supply capacity calculation method based on main transformer interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 86-91.
- [3] LIU H, HAN J, GE S, et al. Improved analytical method of power supply capability on distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 97-104.
- [4] 肖峻, 祖国强, 贺琪博, 等. 馈线联络对配电网最大供电能力的作用机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 38-44, 52.  
XIAO Jun, ZU Guoqiang, HE Qibo, et al. The mechanism of feeder connection on the maximum power supply capacity of distribution network[J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2015, 39(8): 38-44, 52.
- [5] 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. Power supply capacity model of distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 47-52.
- [6] 肖峻, 甄国栋, 祖国强, 等. 配电网安全域法的改进及与  $N-1$  仿真法的对比验证[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 57-63.  
XIAO Jun, ZHEN Guodong, ZU Guoqiang, et al. Improvement of distribution network security domain method and comparison and verification with  $N-1$  simulation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 57-63.
- [7] LUO Fengzhang, WANG Chengshan, 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.
- [8] 荆朝霞, 李晓波, 郭志峰, 等. 一种综合考虑馈线和主变约束的配电网主变  $N-1$  校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 111-117.  
JING Zhaoxia, LI Xiaobo, WU Zhifeng, et al. An  $N-1$  verification method for the main transformer of the distribution network considering the feeder and main transformer constraints[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 111-117.
- [9] 葛少云, 孙昊, 刘洪, 等. 考虑可靠性与故障后负荷响应的主动配电网供电能力评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 77-84, 91.  
GE Shaoyun, SUN Hao, LIU Hong, et al. Power supply capability evaluation of active distribution network considering reliability and post-fault load response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 77-84, 91.
- [10] 肖峻, 屈玉清, 张宝强, 等.  $N-0$  安全的城市配电网安全域与供电能力[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 12-19.  
XIAO Jun, QU Yuqing, ZHANG Baoqiang, et al. Security region and supply capability of urban distribution network with  $N-0$  security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 12-19.
- [11] 赵礼峰, 白睿, 宋常城. 求解网络最大流问题的标号算法[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(12): 113-115.  
ZHAO Lifeng, BAI Rui, SONG Changcheng. Labeling algorithm for solving network maximum flow problem[J]. Computer Technology and Development, 2011, 21(12): 113-115.
- [12] 赵礼峰, 董方. 一种求解网络图最大流的新算法[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(2): 120-122.  
ZHAO Lifeng, DONG Fang. A new algorithm for solving the maximum flow of network graphs[J]. Computer Technology and Development, 2014, 24(2): 120-122.
- [13] 邵丽萍, 赵礼峰. 基于宽度优先的网络最大流求解算法[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(6): 62-65.  
SHAO Liping, ZHAO Lifeng. Algorithm for solving network maximum flow based on width first[J]. Computer Technology and Development, 2019, 29(6): 62-65.
- [14] 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. Calculation method of power distribution system power supply capacity considering main transformer overload and tie capacity constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 97-103.
- [15] WANG Jian, XIONG Xiaofu, HU Jian, et al. Safety strategy of power transmission channel coordinated with transfer capability support for power system emergency[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 110: 232-245.
- [16] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. theory and equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 16(2): 171-175.
- [17] 陈强, 王建, 熊小伏, 等. 考虑设备动态过载能力的风电送出通道紧急过载运行策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 163-171.  
CHEN Qiang, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. Wind power transmission channel emergency overload operation strategy considering equipment dynamic overload capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 163-171.
- [18] International Electrotechnical Commission. IEC TR62271-306. High-voltage switchgear and control gear-part 306: guide to IEC 62271-100, IEC62271-1 and other IEC standards related to alter national current circuit-breakers[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2012.
- [19] 朱嘉麒, 董树锋, 徐成司, 等. 考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7):

2275-2282.  
 ZHU Jiaqi, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Evaluation method of maximum power supply capacity of distribution network considering multiple power transfer[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2275-2282.

[20] 白浩, 于力, 姜臻, 等. 考虑售电侧放开后的配电网供电能力计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 99-105.  
 BAI Hao, YU Li, JIANG Zhen, et al. Considering the calculation method of the power supply capacity of the distribution network after the retail side is opened[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 99-105.

[21] 志皓, 孙毓婕, 丰颖, 等. 大电网静态稳定主导模式在线判别方法研究[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 276-284.  
 ZHI Hao, SUN Yujie, FENG Ying, et al. Research on on-line discrimination method of static stability dominant mode of large power grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 276-284.

[22] 荆朝霞, 李晓波, 邬志峰, 等. 一种综合考虑馈线和主变约束的配电网主变 N-1 校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 111-117.  
 JING Zhaoxia, LI Xiaobo, WU Zhifeng, et al. A check method for main transformer N-1 of distribution network considering the feeder and main transformer constraints[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 111-117.

[23] 国家电网公司. 城市电力网规划设计导则: Q/GDW 156—2006[S]. 北京: 国家电网公司, 2006.

[24] 肖峻, 屈玉清, 宋晨辉, 等. 城市配电网正常运行约束安全域及最大供电能力的网络流本质[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4368-4387.  
 XIAO Jun, QU Yuqing, SONG Chenhui, et al. The nature of network flow that restricts the safety zone and maximum power supply capacity of the normal operation of urban distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4368-4387.

[25] 张雅迪, 方朝雄, 张林垚, 等. 基于有向图的配网供电能力实用计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 10-16.  
 ZHANG Yadi, FANG Chaoxiong, ZHANG Linyao, et al. Practical calculation method of distribution network power supply capacity based on directed graph[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 10-16.

[26] GOLDBERG A V, TARJAN R E. Efficient maximum flow algorithms[J]. Communications of the ACM, 2014, 57(8): 82-89.

[27] 田春笋, 殷奕恒, 关朝杰, 等. 基于供电分区的中高压配电网综合评价策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 152-159.  
 TIAN Chunzheng, YIN Yiheng, GUAN Chaojie, et al. Comprehensive evaluation strategy for medium and high voltage distribution network based on power supply zoning[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 152-159.

[28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 供配电系统设计规范: GB 50052—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.

[29] XU Y, LIU C, SCHNEIDER K, et al. Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 426-437.

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-05-06

作者简介:

黄文韬(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电运维管理工作; E-mail: huangwentao@guangzhou.csg.cn

张波(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: zbobo5243@foxmail.com

王建(1986—), 男, 通信作者, 博士(后), 副教授, 博士生导师, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警, 电力系统保护与控制。E-mail: wangrelay@foxmail.com

(编辑 魏小丽)