

# 一种快速估算运行状态母线短路容量的方法

唐建清

(徐州供电公司, 江苏 徐州 221005)

**摘要:**实时估算运行状态下的母线短路容量,对于评估系统在各种扰动工况下的稳定水平以及继电保护整定计算具有十分重要的实践价值。针对不同运行方式下母线的实时短路容量不易获取的问题,运用戴维南定理对母线的系统侧进行端口等效,并依据负荷工况的变化对母线电压功角影响的条件,推导出功率变化量、电压变化率与母线短路容量之间关系。由于功率变化量和电压变化率便于直接测量,依据上述三者之间的关系,就能方便地估算出母线短路容量。

**关键词:**戴维南等效;负荷工况;功角差;短路容量;在线估计

**中图分类号:** TM 712

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2014)06-0026-04

母线短路容量是表征电力系统运行特征的一个重要参数,短路容量的大小反映了该母线与系统之间联系的紧密程度;母线短路容量越大,表示母线与系统之间的联系越紧密,母线电压受负荷波动的影响就越小,同时,若系统发生短路,则短路电流也越大;相反,若母线短路容量越小,则表示母线与系统的联系越弱,母线电压随着负荷变化而产生的波动也越明显,母线及负荷侧发生短路时的短路电流也就越小。

基于短路容量,可以评估系统的状态脆弱性<sup>[1]</sup>和电压稳定水平<sup>[2,3]</sup>。文献[4]指出,电网结构是影响系统短路容量的重要因素,但系统运行方式对短路容量的影响更为频繁和直接。在生产实际中,对母线短路容量大多采取一种相对静态的估算方法,即由上级电力调度部门根据年度运行方式和假定的若干种边界条件,给出本级电网的各条母线在大、小两种方式下的系统阻抗,下一级电力调度部门再据此计算本级电网各条母线在不同运行方式下的系统阻抗。这种系统阻抗一般在每年的年初以文件的形式下达,供继电保护整定计算、电网方式安排使用。当电网发生机组并网或检修、主变或线路停役等工况时,系统阻抗的取值将在大方式和小方式之间变化。即可供参考的系统阻抗一年只下达一次,是静态的,而电网方式是随时会发生变化的,实际系统阻抗是动态的,这种动静之间的差异将对阻抗型和电流型保护的保护范围产生影响,也会对母线电压水平的抗扰动能力产生影响。如果能在误差可接受的范围内快速估算出母线的短路容量或系统阻抗,无疑将有利于改善上下级配电网之间的保护配合特性,也便于采取更主动、更精确的方式调控母线的运行电压,保证电能质量。文献[5]提出了在典型潮流下通过灵敏度计算确定主要的发电机和负荷组,并以此为训练样本建立广义回归神经网络,然后再对运行态的母线短路容量进行辨识,文

献[6]甚至利用类似的人工神经网络对短路容量进行短期的预测,此类方法计算量较大、训练过程不易把握;文献[7]利用大负荷扰动法对母线短路容量进行模拟实测,但该方法难以实现常规运行状态下的实时监测。

## 1 快速估算系统阻抗的方法

从待估算的母线向系统侧看过去,系统阻抗 $Z_{xt}$ 大致包括3个部分:发电机暂态电抗 $X_d'$ 、输电线路阻抗 $Z_L$ 和上级电网的变压器阻抗 $Z_B$ 。考虑到系统侧复杂的环网结构,且上级电网的发电机、线路、变压器这三类参数对于下级电网的技术人员不方便获取,因此直接算法不能奏效,等效戴维南定理(Thevenin's theorem)有助于解决这个问题。根据戴维南定理,对于变电站的任一段母线,其电源侧可以等效为一个含内阻的电压源两端口网络,母线的负荷侧就相当于这个两端口网络的外部负载,如图1所示。

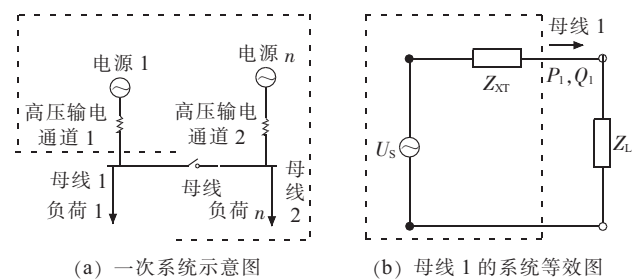


图1 系统阻抗的两端口等效网络

图1(a)中,高压输电通道是指本段母线电源侧的综合通道,可能包括不同电压等级的变压器和输电线路的各种组合。图1(b)中, $U_s$ 就是某段母线向电源侧看过去的等效电源。若图1(a)中母联开关处于断开状态,则图1(b)中等效 $U_s$ 就是“电源1”、等效内阻 $Z_{xt}$ 就是“高压输电通道1”的阻抗;若母联开关处于合闸状态,则 $U_s$ 就是该段母线在“电源1”和“电源2”共同作用下的空载电压, $Z_{xt}$ 就是“高压输电通道1”的阻抗与“高压输电通道2”的阻抗的并联。

假定等效电源在一定的时间区间内保持恒定,则估算母线短路容量  $S_d$  就等价于估算该母线电源侧的系统阻抗  $Z_{XT}$ 。由于实际的系统不能用短路去测得  $S_d$ ,可行途径只有从常规的负载工况下获取。即,利用不同的负载工况下电路特征参数的变化提取系统的短路容量信息。实际上,文献[8]和文献[9]提出以相邻时刻的发电机节点无功变化量和负荷节点电压变化量作为评价系统薄弱节点的方法就是一种估算系统短路容量的过程。从图 1(b)中容易得到:

$$\dot{U}_s = \dot{U}_1 + \frac{\dot{U}_s}{\dot{Z}_{XT} + \dot{Z}_1} \times \dot{Z}_{XT} \quad (1)$$

式(1)中: $\dot{U}_1$ 是 $\dot{Z}_1$ 的端电压。

假设在不同的负载工况下, $U_s$ 保持恒定,则负载阻抗从 $\dot{Z}_1$ 变化到 $\dot{Z}_2 = \dot{Z}_1 + \Delta\dot{Z}$ 时,则有:

$$\dot{U}_s = \dot{U}_2 + \frac{\dot{U}_s}{\dot{Z}_{XT} + \dot{Z}_2} \times \dot{Z}_{XT} \quad (2)$$

同样, $\dot{U}_2$ 是变化后负载 $\dot{Z}_2$ 的端电压。考虑到

$\frac{\dot{U}_s}{\dot{Z}_{XT} + \dot{Z}_1} = \frac{S_1}{\dot{U}_1} = \frac{P_1 + jQ_2}{\dot{U}_1}$  和  $\frac{\dot{U}_s}{\dot{Z}_{XT} + \dot{Z}_2} = \frac{S_2}{\dot{U}_2} = \frac{P_2 + jQ_2}{\dot{U}_2}$ , 综合式(1)和式(2)可得:

$$\dot{U}_1 + \frac{S_1}{\dot{U}_1} \times \dot{Z}_{XT} = \dot{U}_2 + \frac{S_2}{\dot{U}_2} \times \dot{Z}_{XT} \quad (3)$$

移项,得:

$$\left( \frac{S_1}{\dot{U}_1} - \frac{S_2}{\dot{U}_2} \right) \times \dot{Z}_{XT} = \dot{U}_2 - \dot{U}_1 \quad (4)$$

等式左边通分,得:

$$\frac{S_1 \dot{U}_2 - S_2 \dot{U}_1}{\dot{U}_1 \dot{U}_2} \times \dot{Z}_{XT} = \dot{U}_2 - \dot{U}_1 \quad (5)$$

等式两边同除以 $\dot{U}_1$ ,得:

$$\frac{S_1 \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} - S_2}{\dot{U}_1 \dot{U}_2} \times \dot{Z}_{XT} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\dot{U}_1} = \Delta\dot{U}_r \quad (6)$$

当 $\dot{U}_1 \approx \dot{U}_2$ 时,上式可简化为:

$$\frac{S_1 - S_2}{\dot{U}_1} \times \dot{Z}_{XT} = \frac{\Delta S}{\dot{U}_1^2 / \dot{Z}_{XT}} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\dot{U}_1} = \Delta\dot{U}_r \quad (7)$$

即:

$$\frac{\Delta S}{\Delta\dot{U}_r} = \frac{\dot{U}_1^2}{\dot{Z}_{XT}} = S_d \quad (8)$$

另外根据文献[10],并联电容器投入电网后引起的电压波动可按下式计算:

$$\Delta U = U_{s0} \frac{Q_C}{S_d} \quad (9)$$

式(9)中: $U_{s0}$ 为电容器投入前的电网电压,kV; $Q_C$ 为投入的电容器容量,Mvar; $S_d$ 为母线的短路容量, $MV \cdot A$ ; $\Delta U$ 为投入并联电容器前后的电压变化值,kV。

即:

$$\Delta U = U_{s1} - U_{s0} \quad (10)$$

式(10)中: $U_{s1}$ 为电容器投入后的电网电压,kV。显然,式(8)和式(9)在本质上是等价的。

在实际工作中, $\Delta U$ , $U_{s0}$ 和 $Q$ 往往更便于测量,则估算母线的短路容量可通过上述3个参量间接求得。综合式(9)和式(10),母线的短路容量可由下式估算:

$$S_d = U_{s0} \frac{Q_C}{U_{s1} - U_{s0}} \quad (11)$$

值得注意的是,为了保持切除电容器和投入电容器2种运行工况在利用式(11)估算短路容量的逻辑一致性,采取切除电容器方式时,式(11)中的 $U_{s0}$ 和 $U_{s1}$ 分别为电容器切除后和切除前的电网电压。即认为电容器切除过程是电容器投入过程的逆过程。

## 2 某变电站模拟计算示例

以苏北地区某110 kV变电站为例,其系统接线如图2所示。

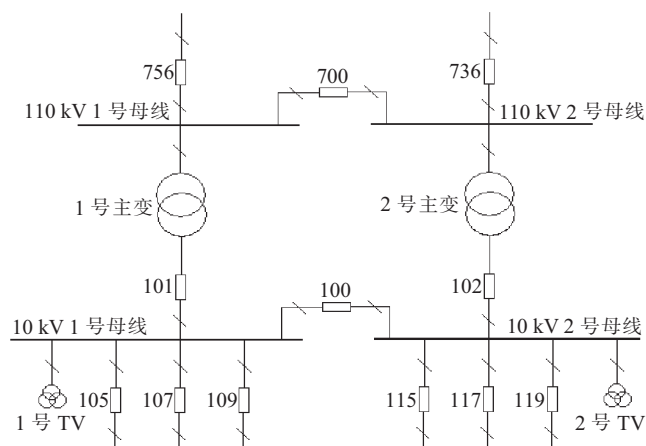


图2 某110 kV变电站一次系统接线图

根据该公司2014年2月份下达的《年度地区电网继电保护整定方案及调度运行说明》,该110 kV变电站的10 kV 2号母线在最大和最小运行方式下的系统阻抗有名值分别为0.26/0.47  $\Omega$ ,若取 $S_B$ 为100  $MV \cdot A$ , $U_B$ 为10.5 kV,则单位阻抗的标幺值 $Z^*$ 与有名值之间的关系为:

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{10.5^2}{100} = 1.1025 \Omega$$

于是,该 10 kV 母线在最大/最小方式下的系统阻抗标幺值分别为:

$$Z_{\max}^* = \frac{Z_{\max}}{Z_B} = \frac{0.26}{1.1025} = 0.23583 \text{ p.u.}$$

$$Z_{\min}^* = \frac{Z_{\min}}{Z_B} = \frac{0.47}{1.1025} = 0.42630 \text{ p.u.}$$

以某日该 110 kV 变电站的电容器投切所引起的母线电压波动曲线如图 3 所示。

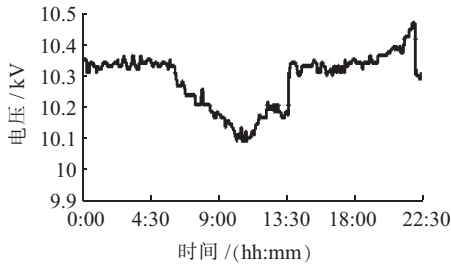


图 3 电容器投切前后的母线电压变化曲线

从图 3 可看出,电容器组于 13:45 投入后,该 110 kV 变电站的 10 kV 2 号母线电压从 10.17 kV 升至 10.30 kV;该电容器于当日 22:15 退出后,母线电压从 10.45 kV 降至 10.29 kV。已知该变电站 10 kV 2 号母线所属电容器组的额定容量为 4500 kvar,若取电容器投入方式下的电网参数变化情况为计算依据,则由式(11)可估算该变电站 10 kV 2 号母线的短路容量为:

$$S_{d,T}' = 10.17 \times \frac{4500/1000}{10.30-10.17} = 352 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

对应当时运行方式下的系统阻抗标幺值<sup>[11]</sup>为:

$$Z_{XT1}^* = \frac{S_B}{S_d} = \frac{100}{352} = 0.28406 \text{ p.u.}$$

显然,  $Z_{XT1}^* \in [0.23583, 0.42630]$ , 即此时的运行方式处在《年度地区电网继电保护整定方案及调度运行说明》确定的运行方式之内,符合运行的实际情况。如果以电容器切除方式下的电网参数变化情况为计算依据,则该变电站 10 kV 2 号母线的短路容量为:

$$S_{d,Q}' = 10.29 \times \frac{4500/1000}{10.45-10.29} = 289 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

对应当时运行方式下的系统阻抗标幺值为:

$$Z_{XT2}^* = \frac{S_B}{S_d} = \frac{100}{289} = 0.345535 \text{ p.u.}$$

显然  $Z_{XT2}^*$  数值也落在  $[0.23583, 0.42630]$  确定的运行方式之内。不难看出,夜间运行方式偏小,而白天运行方式偏大,这与实际电网的运行情况也是吻合的。

### 3 算法的误差分析

仍然以上述案例为背景,该变电站的 10 kV 2 号母线电容器的实测电流曲线如图 4 所示。

因母线电压对电容器的实际输出容量有一定程度的影响,如果需要更为精确的计算,可以根据实测的电

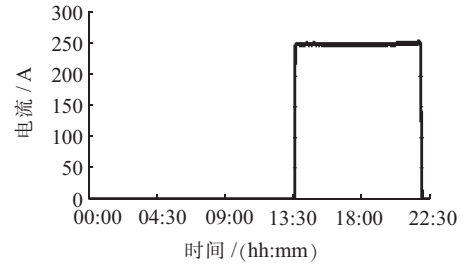


图 4 电容器投切前后的电容器电流变化曲线

容器电压和电流数据作为计算电容器实际输出容量的依据。图 4 中,电容器组于 13:45 投入后,电容器的相电流为 251.46 A,电容器组于 22:15 切除前,电容器的相电流为 254.53 A,则投入电容器方式的母线短路容量为:

$$S_{d,T}^* = 10.17 \times \frac{\sqrt{3} \times 10.30 \times 251.46 / 1000}{10.30-10.17} = 351 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

切除电容器方式下的母线短路容量为:

$$S_{d,Q}^* = 10.17 \times \frac{\sqrt{3} \times 10.45 \times \frac{254.53}{1000}}{10.30-10.17} = 296 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

比较  $S_{d,T}'$ ,  $S_{d,Q}'$  和  $S_{d,T}^*$ ,  $S_{d,Q}^*$  的计算结果,可见由母线电压导致电容器输出容量变化所产生的影响较小,可忽略不计。在工程计算中,电容器容量直接取其额定容量能够满足实际应用的需求。另外,式(11)中的  $U_{s0}$  和  $U_{s1}$  均应为矢量,但是在工程运用中,矢量计算比较繁杂,所以文中的示例均采用标量的计算方法,其间的误差是否会对计算结果产生严重的影响,理论分析和实际运行情况均表明,在正常的负荷变动情况下,母线电压的功角差一般不大于  $5^\circ$ ,仍以上述示例为背景,在投入电容器方式下,按照标量法计算,电压变动值为:

$$\Delta U = U_{s1} - U_{s0} = 10.30 - 10.17 = 0.13 \text{ kV}$$

如果采取矢量法,则:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_{s1} - \dot{U}_{s0} \quad (12)$$

假设  $\Phi_1, \Phi_0$  分别为  $\dot{U}_{s0}$  和  $\dot{U}_{s1}$  的功角,则 2 个电压之间的实际矢量差随着它们的功角差的变化,如图 5 所示。

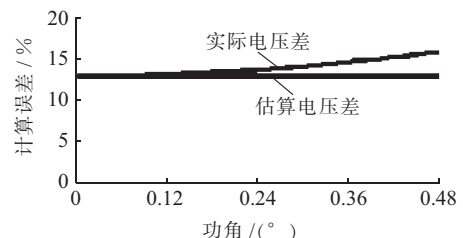


图 5 矢量法与标量法计算电压差的误差示意图

从图 5 可看出,当  $\dot{U}_{s0}$  和  $\dot{U}_{s1}$  之间的夹角小于  $0.2^\circ$  时,2 种算法的计算结果误差很小,但随着夹角的增大,误差也显著增大。当夹角为  $0.5^\circ$  时,计算误差达到

18%;当夹角为 $1^\circ$ 时,计算误差达到41%。可见要想取得满意的计算精度,其前提是工况变化前后电压的相角差要尽可能的小。由电力系统分析的理论可知,上述不同工况下电压间的夹角大小与母线馈出的有功功率变化量成正比、与母线电压成反比。

在上述示例中,电容器投入前后,母线馈出的有功功率分别为15.22 MW和15 MW,变化率仅为1.445%;同样电容器切除前后,母线馈出的有功功率分别均为17.75 MW,几乎没有变化,故结果具有良好的计算精度,符合工程实际。

#### 4 结束语

利用端口等效原理对母线的系统侧进行等价处理,在系统阻抗 $Z_{XT} \ll$ 负载阻抗 $Z_L$ 的条件下,对不同负载工况引起的母线电压变化做了近似计算,并给出了母线馈出的功率变化量、母线电压变化率以及母线的短路容量这三者之间的关系。结合实际的运行数据,并对照正式发布的电网年度运行方式文件,验证了算法的正确性和有效性,最后分析了可能影响算法精度的2个因素,并给出了相关结论。实时掌握母线的短路容量信息可以为实现变电站母线电压质量的精细化控制、配电网的无功优化配置以及继电保护整定计算提供了可靠的依据,且具有十分重要的实践价值。

### A Method for Fast Calculation of Operating Bus Short-circuit Capacity

TANG Jianqing

(Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221005, China)

**Abstract:** Estimating short circuit capacity of bus is important for evaluating system robustness and is essence to setting and coordinating relaying protections. The short circuit capacity calculation for operating bus is not convenient. In this paper, the Thevenin's theory is applied to construct a two-port network for operating bus with different loading conditions. Then, the relationships among power increment, voltage regulation and short circuit capacity is obtained. Considering power increment and voltage change rate are easy to measure, the short circuit capacity calculation for operating bus can be obtained.

**Key words:** thevenin's equivalent; loading operation; power angle difference; short circuit capacity; estimated on line

(上接第25页)

### Design and Application of Transient Fault Monitoring Device for $\pm 500$ kV HVDC Transimission Lines

WEI Xu<sup>1</sup>, XIE Tianxi<sup>2</sup>, WANG Mingmin<sup>1</sup>, TAO Fengbo<sup>2</sup>, ZHOU Zhicheng<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China)

**Abstract:** When HVDC transmission system has a system failure or outage because of equipment insulation withstand transient overvoltage threat, the recorder in nowadays can only record the pole line voltage and current, it can't provide the high frequency fault waveform information related to identify the fault in a short time, so the time of trouble shooting and restoring power supply will be delayed. In order to monitor the transient traveling wave and lightning invasion wave through the HVDC transmission line, this paper designed a transient fault monitoring device for  $\pm 500$  kV DC transmission line, including suitable new power supply system, the high frequency sensor, data collecting and transmission unit. Based on the design, the prototype of the device is used and the lightning waveform data is monitored and showed its validity and reliability. This paper provides technical means to monitor, identify and reproduce a transient fault of HVDC transmission system.

**Key words:** HVDC; transimission line; transient fault monitoring; traveling wave; rogowski coil

#### 参考文献:

- [1] 夏刚. 基于母线短路容量的状态脆弱性评估建模与仿真分析[J]. 陕西电力, 2013(2): 18-22, 27.
- [2] 覃芸, 王延伟, 徐箭. 基于短路容量的电压稳定裕度指标在湖北电网中的应用分析[J]. 广东电力, 2013, 26(2): 10-15.
- [3] 邓佳平, 孙元章, 徐箭. 一种考虑母线短路容量的电压稳定解析方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 15-19, 38.
- [4] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 电网结构对短路电流水平及受电能力的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 62-67.
- [5] 潘睿, 刘俊勇, 郭晓鸣, 等. 基于灵敏度特征决策的GRNN短路容量智能辨识[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6): 1-5, 13.
- [6] 潘睿, 刘俊勇, 倪雅琦, 等. 基于负荷预测及广义回归神经网络的短路电流超短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 94-99.
- [7] 武云生, 胡波, 朱敏. 利用负荷干扰测算铜川、耀县变电所母线短路容量的试验研究[J]. 西北电力技术, 1996(2): 1-10.
- [8] 万秋兰, 丁涛, 王莹, 等. 薄弱电压节点的在线辨识[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 156-161.
- [9] 王漪, 柳焯. 基于戴维南等值的系统参数跟踪估计[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 16-24.
- [10] 中国电力企业联合会. GB 50227—2008 并联电容器装置设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009: 59.
- [11] GB/T 14285—2006, 继电保护和安全自动装置技术标准[S].

作者简介:

唐建清(1966), 男, 江苏常熟人, 高级工程师, 从事电力系统规划及管理工作。