

变电站母线短路容量就地测量方法

邓 朴¹, 郝正航², 薛 毅¹, 张广梅³, 陈 薇²

(1. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025;
3. 贵州电网有限责任公司六盘水供电局, 贵州 六盘水 553000)

摘 要: 母线短路容量是电力系统运行与控制所需的关键参数, 在线测量短路容量对电网实现可观性和可控性至关重要。通过对并联电容器投切引起母线电压扰动, 并根据电压扰动进行电网母线短路容量的在线测定。首先, 基于变电站电路模型, 采用线性电路的替代定理和叠加原理, 推导母线短路容量测量的精确计算方法。所提方法揭示电容器投切引起的电压矢量相位变化是影响测量精度的关键因素, 突破既往研究的近似公式, 具有很高的精确性; 其次, 进一步提出电压矢量相位差的迭代计算方法, 该方法比直接测量更加方便可靠。最后, 基于 Matlab/Simulink 建立变电站母线及在线测量模型, 对多种场景的仿真分析, 结果表明, 所提方法测量误差小于 1%, 技术上易于实施和实用化推广。

关 键 词: 电力工程; 短路容量; 在线测量; 迭代计算

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.023 中图分类号: TM93 文章编号: 1673-9140(2021)02-0192-07

Research on the local measurement method of bus short-circuit capacity for the electricity substation

DENG Pu¹, HAO Zhenghang², XUE Yi¹, ZHANG Guangmei³, CHEN Wei²

(1. Power Grid Planning and Research Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Liupanshui Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 553000, China)

Abstract: The short-circuit capacities of buses are key parameters required for the operation and control of power systems. On-line measurement of short-circuit capacity is an effective method to achieve the observability and controllability of power grids. This paper proposes an on-line measurement method to estimate the short-circuit capacity of the grid bus according to the bus voltage fluctuation triggered by switching the parallel capacitors. Firstly, based on the circuit model of substation and the substitution and superposition theorem of the linear circuit, an accurate calculation method for measuring the bus short-circuit capacity is derived. It reveals that the phase-angle differences of the voltage vector caused by the capacitor switching is a crucial factor affecting the measurement accuracy, which is an important improvement compared with the approximate formula of previous studies. The proposed measurement method has high precision. The proposed iterative calculation method for the voltage vector phase difference is more convenient and reliable than the direct measurement. The effectiveness of the proposed on-line measurement method is tested on a detailed substation bus model on Matlab/Simulink. According to the tests in various situations, the simulation results show that measurement error of the proposed method is less than 1%.

Key words: power engineering; short-circuit capacity; on-line measurement; iterative calculation

收稿日期: 2019-07-21; 修回日期: 2019-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(51567005)

通信作者: 邓 朴(1963-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统稳定与控制研究; E-mail: 2410406553@qq.com

随着现代电力系统规模和结构的变化,短路容量作为电力系统运行与控制所需的关键参数,受到越来越多的重视。继电保护参数整定、电能质量测试、新能源接入规划、高压直流输电规划等都要尽可能准确知道系统短路容量^[1-3]。然而,短路容量计算作为一种常用电气计算,长期以来形成了一种思维惯性:电网各个节点短路容量(短路电流、短路阻抗)的获取,只能依靠电力系统短路计算得到。基于现场测量的短路容量获取方法研究进展缓慢。

常规离线计算存在较多固有缺陷:①短路容量计算需要准确的电网拓扑、线路参数、变压器参数、发电机及其调节器参数,这些参数数据量庞大、经常变化、数据错误或误差很难避免,特别是没有纠错检验方法,发生计算错误后难以发现;②对现场应用技术人员而言,短路计算往往显得繁琐和困难,二次及一次设备运维人员几乎无法正确完成计算作业,不能检查继保整定值的合理性,也不能判定一次设备短路容量的合理性;③发电企业及用电企业不拥有完整的电网数据,难以计算短路容量(或短路电流),一、二次设备自我维护与整定困难。因此,不依靠复杂电网参数的电网容量测量技术具有非常现实的多方需求。

短路容量的在线测量技术有过一些研究,但成果不多。文献[4-6]采用人工方法开展短路试验或利用短路事故进行短路电流的特征分析,这类方法的方便性和安全性很差。文献[7]在电网监控软件中增加对系统拓扑的分析,而后根据电网模型及传统计算方法得出电网各母线处的短路容量,其本质仍然属于基于电网模型的分析,仍然保留离线计算的缺点,而且该方法依赖电网监控系统能够覆盖的前提。文献[8]给出了在母线空载前提下通过投切电容器测量短路容量的方法,该方法无法满足母线上各馈线负载正常供电的要求,也没有考虑母线戴维南阻抗中电阻成分的影响,是一种很理想化的测量方法,应用价值不大。文献[9]根据风电场的无功功率补偿关系、无功功率为零时的电压值以及至少两组无功功率值及与其对应的电压值,得到母线短路容量。该方法仅适用于接有风电场专线的变电站母线情形,方法不具有通用性。文献[10]根据无功变化并测量电压有效值波动,解算短路容量,所述方

法均为近似方法,精度无法保证。

直到目前,实用化的电网母线短路容量测量技术和装置仍未开发出来,电网企业和其他工业企业为获取短路容量仍然只能依靠基于模型的常规计算^[11-15],无法满足智能电网的可观、可控和透明的要求。

1 概念描述

1.1 短路容量概念

电网短路容量是针对电网中的某一母线而言的,故更准确地讲应是母线的短路容量,不同母线处的短路容量一般也不同。母线短路容量反映了该处电网的强弱,该处短路容量大则称之为强系统,反之则为弱系统。由于对系统强弱的准确判断往往关系到系统设计、运行和控制的方方面面,所以短路容量成为必须关注的技术参数。

电力系统包含很多发电厂、各级输配电网及负荷。单独考察某一母线时,不失一般性,将母线及其所联系的电力系统如图 1 所示表达。母线上有若干馈线负荷和若干电容器组,为了抽象描述,可以归并为一个负荷和一组电容器。

当母线发生三相短路时,网络上所有电源都提供短路电流,短路点的入地电流为 I_f ,该母线额定电压为 V_B ,则短路容量:

$$S_f = \sqrt{3} V_B I_f \quad (1)$$

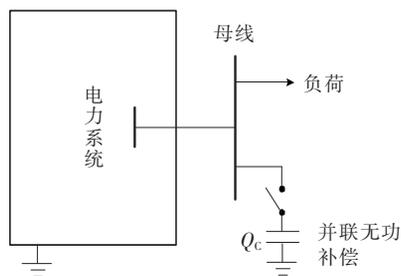


图 1 电力系统及其变电站母线

Figure 1 Power system and its electricity substation bus

1.2 短路容量与系统内抗的关系

式(1)给出了短路容量的定义,表明短路容量与短路电流成正比,但该式没有揭示出短路容量的电路意义。事实上,母线短路容量是由该母线向系统看进去的戴维南阻抗决定的,其电路意义如图 2 所示。

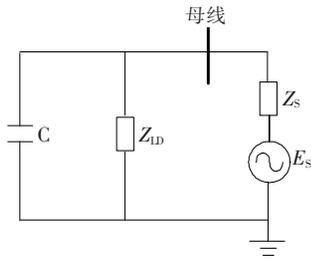


图2 母线短路容量电路模型

Figure 2 The circuit model of bus short-circuit capacity

结合图1、2, Z_S 是从母线向电力系统看进去的戴维南阻抗, E_S 是母线空载(所有负荷及无功设备退出)时的电压, 也称为母线的内电势, Z_{LD} 代表负荷的恒定阻抗, C 为无功补偿电容器。 Z_S 为系统的结构参数, E_S 为运行参数。从图2可以得到, 母线短路电流仅由 E_S 和 Z_S 决定, 即

$$I_f = \frac{E_S}{Z_S} \quad (2)$$

由于电力系统各母线电压都只能在额定电压附近运行, 故 E_S 只能在小范围变化。若假设 $E_S = V_B$, 则 I_f 和 S_f 都仅由 Z_S 决定。因此, 该文所提短路容量的测量, 实质上是对 Z_S 的测量。应当说明, 在测量 Z_S 时, 并不需要假设 $E_S = V_B$, 而是将 E_S 视为未知变量。

2 测量法原理

2.1 测量法的电路建模

由文1.2节可知, 短路容量 S_f 的测量可以归结为系统内抗 Z_S 的测量, 而 Z_S 是否具备可测性是该文的关键问题。由图2可知, 电路中含有2个未知参数 E_S 和 Z_S , 在单一电路状态下无法求出2个未知量, 因此需要人为创造2种电路状态, 且每种电路状态都必须包含2个未知量, 就可以解算出来。基于以上分析, 通过切除或投入电容造成两种电路状态是有可能求出 Z_S 的。

根据电路替代原理, 将电容器用稳定工况下电流源表示, 电流大小等于此时的电容器电流, 电容器元件用电流源 I_C 表示, 图2电路模型转化为如图3所示电路模型。

$$I_C = \frac{V_1}{X_C} \quad (3)$$

式中 V_1 为母线对地电压; X_C 为电容器容抗。

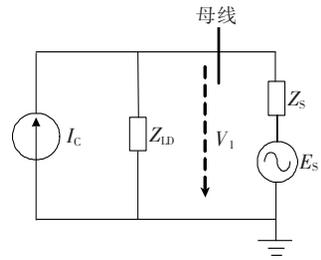


图3 基于替代定理的电路模型

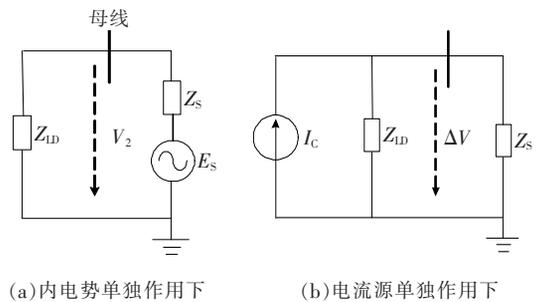
Figure 3 The circuit model based on substitution theorem

图3中有2个电源, 分别是内电势 E_S 和等效电流源 I_C , 故可以分别考虑各个电源单独作用下的电路模型。 E_S 单独作用下的模型如图4(a)所示, 此时相当于电容器切除状态, 母线电压为 V_2 ; I_C 单独作用下的模型如图4(b)所示, 此模型仅有电路分析意义而无实际场景意义, 但该模型仅有一个未知量 Z_S , 可以据此列出测量方程:

$$\frac{\Delta V}{Z_{LD}} + \frac{\Delta V}{Z_S} = I_C \quad (4)$$

由式(4)可知, 若能测量出 ΔV 并知道 Z_S 的阻感比 k , 就可以解出 Z_S 。然而, ΔV 的测量是一个难点。由图4(b)知, ΔV 是 I_C 单独作用时在母线处引起的电压, 只有电路分析的意义, 却无法直接测量其值。

结合图3、4分析可得, 电容器投切前、后的母线电压 V_1 、 V_2 和 ΔV 刚好具有矢量合成关系, 即 V_2 和 ΔV 的矢量和等于 V_1 , 如图5所示。



(a) 内电势单独作用下

(b) 电流源单独作用下

图4 各激励源作用下的电路模型

Figure 4 The circuit model excited by each source

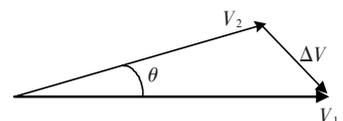


图5 电容器投切前、后的电压矢量关系

Figure 5 Vectors of voltage before and after capacitor switching

可见, ΔV 有另一含义, 即电容器切除前电压矢量与切除后电压矢量的矢量差。这一含义与文献 [9-10] 所述电压幅值差不同, 这也是以往文献测量精度始终不高的根本原因。将图 4(b) 中负荷阻抗和内阻抗的电阻和电抗化为并联形式, 如图 6 所示。 R_{LD} 对应负荷有功功率, X_{LD} 对应负荷无功功率及母线无功补偿容量; X_S 和 R_S 分别对应短路容量的无功分量和有功分量, $R_S = kX_S$ 。

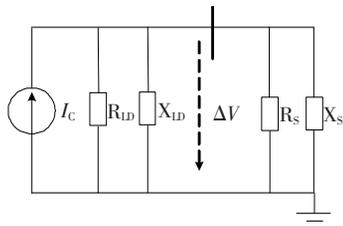


图 6 负荷阻抗及内阻抗的并联形式

Figure 6 Parallel form of Load impedance and Internal impedance

1) 根据图 6, 当不考虑 X_{LD} 时, 可列方程:

$$\left(\frac{\Delta V}{R_{LD}} + \frac{\Delta V}{kX_S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{X_S}\right)^2 = I_c^2 \quad (5)$$

整理式(5)为

$$\left[\frac{1}{R_{LD}^2} - \frac{(I_c)^2}{(\Delta V)^2}\right] X_S^2 + \frac{2X_S}{kR_{LD}} + \left(1 + \frac{1}{k^2}\right) = 0 \quad (6)$$

若 ΔV 可测, 则为已知量, 解式(6)得 X_S , 根据 X_S 求出 R_S 、 Z_S , 进一步可求出短路容量 S_f 。

2) 当考虑 X_{LD} 时, I_c 作用于作为负荷的 X_{LD} 所引起的 ΔV 与 I_c 作用于作为内抗并联支路的 X_{LD} 所引起的 ΔV 是完全等效的。因此, 当考虑 X_{LD} 计算 S_f 时, 只需要在第 1 步的计算结果上再加上与 X_{LD} 对应的短路容量即可, 即再加上并联无功容量和负荷无功容量。

可见, 问题转化为 ΔV 的测量。由图 5 可知, 在 V_1 、 V_2 和 θ 为已知条件下可以根据余弦定理得出 ΔV , 因此, 测量 θ 成为关键。然而 θ 并不是电路分析中 2 个节点之间的相位差, 而是同一节点在不同时刻相对于电网同步旋转相量的相位差, 实际测量较为困难, 电力领域也没有可以借鉴的测量实例。为此, 提出一种针对角差 θ 的迭代计算方法。

3 角差 θ 迭代计算

角差 θ 的准确获取是该项技术成败的决定因

素。在实际电网场景下, θ 变化范围为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 。在该范围内, 存在 3 个特征: ① θ 、 ΔV 具有接近线性的单调对应关系, 即获取 V_1 、 V_2 的幅值测量值后, 按图 5 矢量关系, 较大的 θ 一定对应较大的 ΔV ; ② ΔV 、 X_S 具有接近线性的单调对应关系, 即按式(5)解算, 较大的 ΔV 一定解出较大的 X_S ; ③ X_S 、 θ 具有单调对应关系, 即由图(2)电路决定, 较大的 X_S 一定对应较大的 θ 。以上特征决定了 θ 迭代计算的可行性。

基本原理: 首先, 假设 θ 的初值 $\theta(1) = 0$, 即以 V_1 、 V_2 的幅值差作为 ΔV 的首次估计值 $\Delta V(1)$, 并计算 X_S 的首次估计值 $X_S(1)$, 根据特征①、②, 一定存在 $\Delta V(1) < \Delta V$, $X_S(1) < X_S$; 然后, 基于 $X_S(1)$ 并根据图(2)计算出 θ 的首次迭代值 $\theta(2)$, 根据特征③, 一定存在 $\theta(1) < \theta(2) < \theta$; 最后, 利用 $\theta(2)$ 按前次迭代顺序可得到 $\Delta V(2)$ 、 $X_S(2)$ 、 $\theta(3)$, 且一定存在 $\theta(1) < \theta(2) < \theta(3) < \theta$ 。依此多次迭代, 每次迭代都可以单调逼近真实值, 既不会陷入局部最优点, 也不会迭代发散。根据该基本原理得出角差迭代的流程, 如图 7 所示。

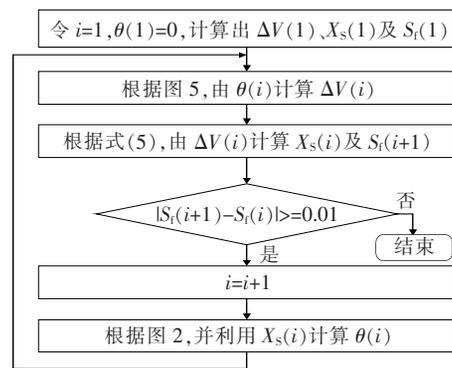


图 7 角差 θ 迭代计算流程

Figure 7 Iterative calculation flow chart of phase-angle differences θ

4 算例分析

为了验证该文测量原理和方法, 基于 Matlab/Simulink 软件平台建立仿真模型。被测对象为变电站母线, 无论母线背后网络如何复杂, 总可以严格等值为电压源—短路阻抗模型, 再建立无功补偿和负荷模型即可。将短路容量测量仪接入到二次回路中, 仿真整体模型如图 8 所示。

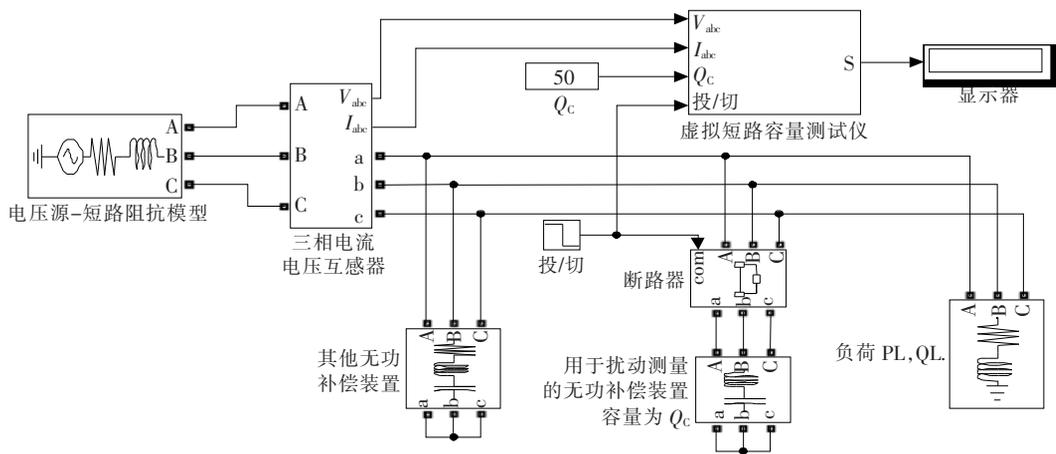


图8 变电站及母线短路容量测量仪模型

Figure 8 The model of substation and busbar short-circuit capacity admeasuring apparatus

参数设置:待测母线电压等级为 35 kV,母线频率设置为 50 Hz,通过电压源—短路阻抗模型的参数设置,系统三相短路容量在合理范围内任意设置;变电站负荷为 $150 + j50 \text{ MV} \cdot \text{A}$;执行切除操作的电容器容量为 50 MVar,母线剩余的其他电容器容量为 70 MVar。

4.1 电容切除量选取

在实际当中,变电站低压母线(35 或 10 kV)上的补偿电容器有大小不等的多组配置。在切除电容之前,应当估算电容切除量,以便确定切除哪一组。为了尽可能降低影响,希望切除电容后电压跌落在额定电压的 2%~5%为宜。据此,切除电容量 S_c 的估算公式为

$$S_c = (2\% - 5\%)S_f \quad (6)$$

4.2 迭代过程分析

仿真参数设置:假设某变电站总变电容量 $S_N = 120 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。现将 35 kV 侧母线作为研究对象,根据《城市电力网规划设计导则_Q/GDW 156—2016》,并考虑实际当中的多数情况,35 kV 母线上的补偿电容设定为 3 组,各组容量分别为 5% S_N 、8% S_N 及 15% S_N 。变电站负荷为 $105 + j20 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。为了兼顾测量精度和投切电容引起的扰动影响,试验当中取容量为 8% S_N (9.6 MVar) 的电容器进行投切操作。

首先预设短路容量为 $400 \text{ MV} \cdot \text{A}$,在 $t = 1 \text{ s}$ 时,切除 9.6 MVar 的电容器组。母线 A 相电压波形如图 9 所示,在 $t = 1 \text{ s}$ 时电容器切除,母线相电压下降 2.2%(444.6 V), $t = 1 \text{ s}$ 前、后的稳态电压由图 8 中短路容量测量仪所记录,基于该波形并依

据该文算法即可得到母线处的短路容量。在迭代过程中,记录每次迭代后的角差 θ 、电压矢量差 ΔV 、内阻抗的电抗分量 X_s 以及与之对应的短路容量测量值 S_f 。各量变化记录如表 1 所示。

从表 1 可以看出,在迭代前,电压矢量相位差 θ 为 0° ,相当于以往文献所用方法,此时所计算出的短路容量值为 $432.7 \text{ MV} \cdot \text{A}$,与理论值 $400 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 相差很大,误差达到 8.18%,已经不可接受。启动迭代后, θ 随迭代次数的增加趋近于稳定值 0.5111;

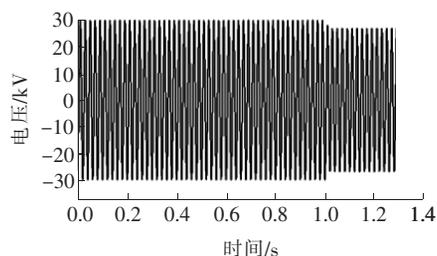


图9 切电容时母线相电压波形

Figure 9 The waveform of phase voltage during capacitor cutting

表1 迭代过程各变量的变化趋势

Table 1 The trends of variables in the iterative process

迭代次数	电压矢量相位差 $\theta/(\circ)$	电压矢量差 $\Delta V/\text{V}$	内阻抗的电抗分量 X_s/Ω	短路容量测量值 $S_f/(\text{MV} \cdot \text{A})$
0	0.000 0	410.1	2.859	432.7
1	0.448 1	436.8	3.063	404.0
2	0.496 6	442.7	3.108	398.1
3	0.507 6	444.1	3.119	396.8
4	0.510 3	444.5	3.121	396.4
5	0.510 9	444.6	3.122	396.3
6	0.511 1	444.6	3.122	396.3

ΔV 由 410.1 趋近于 444.6 V;内阻抗的电抗分量 X_s 由 2.859 趋近于 3.122 Ω ;短路容量测量值由 432.7 趋近于 396.3 MV·A,与理论值 400 MV·A 非常接近,误差仅为 0.93%。

4.3 不同短路容量水平的测量

为了验证该文方法在短路容量大范围变化时的有效性,考虑多种系统场景,将系统分别设置为各种不同的短路容量进行仿真测量。对于 35 kV 电压等级,系统短路容量在 300~1 600 MV·A 范围内是合理的。针对每一种短路容量场景,设置不同的仿真参数,分别基于该文方法进行就地测量。该范围内的测量结果如表 2 所示,可以看出,在各短路水平下,测量值和理论值都非常接近,测量误差均不超过 1%。因切除电容而引起的电压降落在额定相电压的 2.1%~2.4%之间,这样的电压变化对系统是安全的。

尤其说明,虽然 θ 值总体较小,但若忽略该值,如文献[11-13]的做法,则会带来很大误差。以短路容量理论值 500 MV·A 为例,该场景对应的 θ 值仅有 0.4598°,若忽略该值而认为是 0,则会造成短路容量测量值为 529 MV·A。可见 θ 值的准确获取至关重要。事实上,即使采用直接测量法,对于 θ 值为 0.4598°的情形,也是难以确保测量准确性的。而该文提出的迭代方法则很好地解决了该问题。

表 2 不同短路容量水平下的分析与仿真测试结果

Table 2 Measurement results of different short-circuit capacity levels

短路容量理论值 S / (MV·A)	切除容量 S_C / MVar	电压矢量差 ΔV / V	短路容量测量值 S_t / (MV·A)	短路容量测量误差/%
300	7.2	416.7	297.5	-0.83
400	9.6	444.6	396.3	-0.93
500	12.0	459.8	495.3	-0.94
600	14.4	469.2	594.2	-0.97
700	16.8	475.4	693.2	-0.97
800	19.2	479.7	792.2	-0.98
900	21.6	482.9	891.2	-0.98
1 000	24.0	485.4	990.1	-0.99
1 200	28.8	488.8	1 188.0	-1.00
1 400	33.6	491.1	1 386.0	-1.00
1 600	38.4	492.8	1 584.0	-1.00

5 结语

该文通过对短路容量在线测量的机理建模、算法推演和多场景仿真研究,得出以下结论:

- 1)首次揭示了电容器投切引起的电压矢量相位变化是影响测量精度的关键因素,突破了既往研究的近似公式,所提测量方法具有很高的精确性;
- 2)采用迭代求解电压矢量相位差,可以保证收敛性和准确性,比直接测量更加可靠方便;
- 3)采取非故障扰动方式测量电网短路容量,允许带负荷运行,不必在空载条件下进行,不会对电网安全构成影响,不限定电网特定运行方式;
- 4)所提方法不需要完整的电网参数,具有安全性、方便性和及时性,有效弥补了短路容量计算的局限性。

参考文献:

- [1] 谢林枫,王红星,刘军成,等. 基于电能质量约束的智能配电网分布式电源消纳能力研究[J]. 电网与清洁能源,2020,36(4): 41-47.
XIE Linfeng, WANG Hongxing, LIU Juncheng, et al. A study on the distributed generation accommodation capacity of the smart distribution network based on power quality constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 41-47.
- [2] 刘洋,邵广惠,蒋维勇,等. LCC-HVDC 背靠背系统降低电网短路电流应用研究[J]. 高压电器,2020,56(12): 242-250.
LIU Yang, SHAO Guanghui, JIANG Weiyong, et al. Application research of LCC-HVDC back-to-back system to reduce short circuit current of power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 242-250.
- [3] 赵楠,王蓓蓓. 计及多类型需求响应资源的配电网分布式电源优化配置[J]. 中国电力,2019,52(11): 51-59+67.
ZHAO Nan, WANG Beibei. Optimal allocation of distributed generation in distribution system considering multi-type demand response resources[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 51-59+67.
- [4] 季宇,吴鸣,刘海涛,等. 不同类型风电机组对系统短路容量的影响[J]. 电测与仪表,2019,56(22): 72-78.
JI Yu, WU Ming, LIU Haitao, et al. Influence of differ-

- ent wind turbines on short circuit capacity of system [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(22):72-78.
- [5] 马御棠,黄曹炜,王科,等. 交、直流输电线路人工接地短路电流地线分流的测量及频率分析[J]. *高电压技术*, 2017, 43(12): 3914-3921.
- MA Yutang, HUANG Caowei, WANG Ke, et al. Measurement and frequency analysis of short current and its ground wire shunting at artificial grounding fault on AC and DC transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(12):3914-3921.
- [6] 孙洋. 电力系统短路故障电流快速检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2018.
- [7] 孙元章,徐箭,黄磊,等. 一种基于动态转移阻抗的短路容量在线监测方法及其装置[P]. 中国专利:CN102707161A, 2012-10-03.
- [8] 严学文,高伟,张稳稳,等. 基于相电压电流突变量的配电网单相接地故障频域定位方法[J]. *供用电*, 2019, 36(3):50-55+75.
- YAN Xuewen, GAO Wei, ZHANG Wenwen, et al. Frequency domain location method for single-phase grounding fault of distribution network based on break variable of phase voltage and current[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(3):50-55+75.
- [9] 樊俊哲,唐彬,赵亮. 母线短路容量测试方法、装置及系统[P]. 中国专利: CN105548781A, 2016-05-04.
- [10] 甘俊文,邵能灵. 基于机端电压跌落深度的双馈风机自适应短路电流计算方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(3):3-9.
- GAN Junwen, TAI Nengling. Research on adaptive short circuit current calculation of DFIG considering the terminal voltage dip[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(3): 3-9.
- [11] 张武洋,李籽良,李永照,等. 一种电网等值分解及短路计算新方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(14): 43-49.
- ZHANG Wuyang, LI Ziliang, LI Yongzhao, et al. A new method of power grid equivalent decomposition and short-circuit calculation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(14): 43-49.
- [12] 赵瑞,苑画舫,杨俊炜,等. 一种关于静态电压稳定极限的工程改进计算方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(4): 181-186.
- ZHAO Rui, YUAN Huafang, YANG Junwei, et al. An improved engineering calculation method of static voltage stability limit[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(4): 181-186.
- [13] 刘琨,黄明辉,李一泉,等. 智能变电站继电保护在线巡检方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(7): 58-65.
- LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Research on online operation method for protective relay of smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(7):58-65.
- [14] 李奕璋,陈红坤,石晶,等. 基于三相电流平方和比值的短路故障快速检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(24):111-119.
- LI Yizhang, CHEN Hongkun, SHI Jing, et al. A fast short-circuit fault detection method based on the ratio of three-phase currents square sum[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(24):111-119.
- [15] 葛延峰,孙颖,韩子娇,等. 永磁同步风电机组的主动支撑控制及其在弱电网下的适应性分析[J]. *智慧电力*, 2020, 48(4): 62-69.
- GE Yanfeng, SUN Ying, HAN Zijiao, et al. Active support control strategy of permanent magnet synchronous wind turbine and its adaptability analysis under weak grid[J]. *Smart Power*, 2020, 48(4): 62-69.