

福州特高压变电站短路电流分流系数计算与分析

杨凌霜, 邹家勇, 余波

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要: 变电站内发生短路故障时真正引起危害的是入地故障电流, 而不是短路故障电流。分流系数表征了接地网或架空地线对故障电流的分流能力, 可用于分析短路电流的分布情况。研究了变电站站内故障时短路电流的分流机制, 提出了适用于工程实际的分流系数定义, 重点介绍了分流系数的数值计算方法。在此基础上计算了福州特高压变电站的分流系数与短路入地电流, 并分析了分流系数的各种影响因素。分析结果表明: 地线分流系数随着变电站接地电阻的增大而增大, 随着杆塔接地电阻的增大而减小; 500 kV 侧和 1 000 kV 侧短路时地线分流系数差别较小; 随着变电站接地电阻的增大, 最大入地电流减小, 接地电压增大。

关键词: 变电站站内短路; 分流系数; 接地电阻; 短路电流; 接地电压

Abstract: When a short-circuit fault occurs in a substation, it is the current diffusing into ground that actually causes the safety trouble instead of the fault current. Shunt coefficient characterizes the shunt ability of grounding grid or overhead ground wires to fault current, so it can be used to analyze the distribution of short-circuit current. The shunt mechanism of short-circuit current is studied when a fault occurs in substation, a definition of shunt coefficient that is more suitable for engineering practice is proposed, and the numerical computation method of shunt coefficient is introduced. On this basis, the shunt coefficient and current diffusing into ground of Fuzhou 1 000 kV substation are calculated, and various factors affecting the shunt coefficient are analyzed. The results show that shunt coefficient of ground wire increases with the increase of substation grounding resistance and decreases with the increase of tower grounding resistance, the differences of shunt coefficient of ground wires is tiny when short-circuit fault occurs in 500 kV side and 1 000 kV side. With the increase of substation grounding resistance, the current diffusing into ground decreases and the ground potential rise increases.

Key words: short-circuit fault in substation; shunt coefficient; grounding resistance; short-circuit current; grounding voltage

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)05-0022-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.05.006

0 引言

变电站良好的接地是电力系统安全运行的根本保证。电力系统短路故障一般分为变电站站内短路和站外短路两种类型。与站外短路相比, 站内短路对变电站安全运行危害更大, 更容易引起事故。因此这里主要研究变电站站内短路故障^[1]。

变电站内部短路故障电流可分为地线分流、变压器中性点回流和入地电流三部分, 真正产生严重危害、危及人身和设备安全的是入地故障电流。根据 GB/T 50065-2011《交流电气装置的接地设计规范》的规定^[2], 变电站接地系统设计时不仅需要校验短路电流的大小, 还需要分析系统短路分流情况, 从而准确计算短路入地电流, 为接地网设计提供依据^[3]。

变电站接地系统的分流系数是指入地故障电流与短路故障电流的比值。分流系数的合理选择是变电站接地系统设计的基础, 直接关系到变电站的安全运行^[4]。变电站分流系数与短路故障的类型和位置、系统的结构与参数、变电站和杆塔接地电阻、相线和架空地线参数等多种因素有关, 精确计算分流系数非常困难。目前获得分流系数的方法主要有经验公式法和数值算法, 经验公式法模型简单但计算精度较低^[5], 数值算法考虑模型相对复杂, 计算结果较为准确^[6]。因此下面重点介绍分流系数的数值计算方法。

1 计算条件

所研究的变电站为福州特高压 GIS 变电站, 1 000 kV 侧有两回进线, 都为单回线路, 分别为浙南

1线和浙南2线;500 kV侧有四回进线,都为同塔双回线路,分别为笠里1线、笠里2线、宁德1线和宁德2线。变电站内运行主变压器有两台,都是三相自耦变压器。变电站及线路参数如表1、表2、表3所示。

表1 主变压器参数

变压器数量	容量/MVA	短路电压百分比/%
2	1 000	18

表2 导线参数

线路名称	浙南1线	笠里1线	宁德1线
	浙南2线	笠里2线	宁德2线
电压等级/kV	1 000	500	500
导线型号	8 × JL/G 1A - 500/45	4 × JL/LB 20A - 720/50	4 × JL/LB 20A - 720/50
分裂间距/mm	400	400	400
直流电阻 ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.057 8	0.035 5	0.035 5
导线外径/mm	32.2	36.2	36.2
档距/m	400	475	483
线路长度/km	26.47	25.76	194.35

表3 地线参数

线路名称	浙南1线	笠里1线	宁德1线
	浙南2线	笠里2线	宁德2线
地线型号	JLB20A - 240	JLB40 - 150	OPGW - 150
直流电阻 ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.144 4	0.293 5	0.330 0
地线外径/mm	24.8	15.8	16.6

2 分流系数的计算方法

2.1 变电站站内短路电流分析

由于输电线路的架空地线和变电站接地网连为一体,短路故障电流从接地网入地时,一部分电流会通过变电站的地线从杆塔的接地装置和远端变电站入地。入地电流与总故障电流的比值(分流系数)受变电站接地电阻、线路地线电阻、杆塔接地电阻等的影响比较大。此外,架空地线与相导线之间的互感也会起很大作用。实际变电站发生短路故障时,故障电流由线路的相导线提供,即相导线作为电流引线,如图1所示。

由于相导线与地线保持长距离平行且二者之间的距离非常近,这会产生很大的线路互感。相导线提供的故障电流会通过互感的作用在地线中感应出

很大的反向电流,这部分电流是分走故障电流的主要部分之一。对于多回输电线路,由于互感的作用,提供故障电流多的线路地线分走的电流多,其他线路地线分走的电流少;同时,地线电阻和杆塔接地电阻也会对分流起到一定作用。

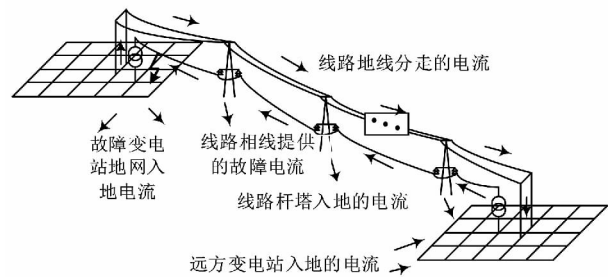


图1 变电站站内故障电流路径

图2为变电站站内故障的等值电路^[7],图中: Z_{G_i} 为架空地线的零序自阻抗; Z_{L_i} 为导线的零序自阻抗; Z_{M_i} 为导线和架空地线间的零序互阻抗; R_i 为输电线路杆塔的接地电阻; R 为变电站接地电阻; R_T 为终端电站的接地电阻; V 为发生短路故障前的电压源。为简便起见,图中给出的每档线路参数采用相同的标识,分析时可以根据实际情况将各接地电阻及阻抗采用不同的值。

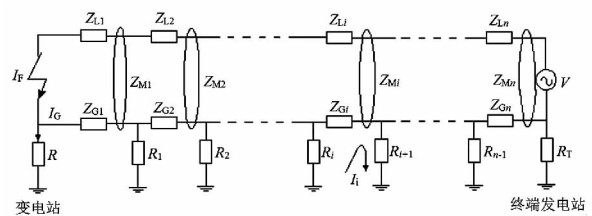


图2 变电站内短路故障时的等效电路

变电站站内短路时,电流分布如图3所示^[8]。短路故障电流为 I_0 (工程设计中经常会提供该电流),该电流是由变压器两侧的无穷远端的电源提供的(无穷远端的电源未出现在图3中),而不仅仅来自于短路侧的电源。根据基尔霍夫定律,这些短路电流终将流回两侧的电源。由于是站内短路,因此部分电流 I_g 会直接通过接地系统由大地流向无穷远端的电源。由于变压器中性点和线路地线都连接在接地网上,因此也有部分电流通过变压器中性点(有时也包含发电机的中性点)和高压侧线路地线流出接地网,即 I_{N} 、 I_{w1} 和 I_{w2} 。对于通过地线流回电源的电流 I_{w1} 和 I_{w2} ,在逐级经过杆塔时又会有部分电流通过杆塔接地系统流向大地,即 I_{w12} 和 I_{w22} ,剩余电流 I_{w11} 和 I_{w21} 则继续通过地线流回电源。

2.2 站内故障的分流系数

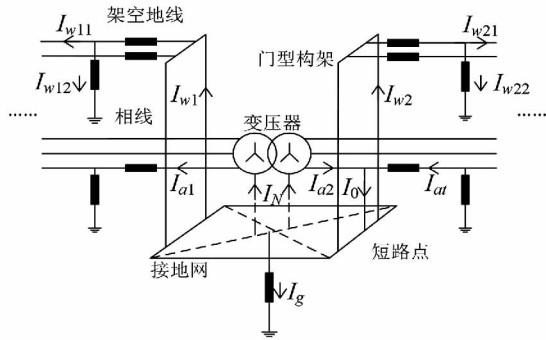


图3 变电站站内短路情况下的电流分布

由2.1节变电站站内短路电流的分流情况可以引出分流系数的定义。分流系数可以分为接地网的分流系数和地线的分流系数两个方面,分别表征变电站发生站内短路故障时,接地网和架空地线对短路故障电流的分流能力。

IEEE标准^[5]和国家标准^[2]中通常给出的是地线的分流系数 K_{sl} ,可表示为

$$K_{sl} = \frac{I_w}{I_0 - I_N} \quad (1)$$

式中 I_w 为所有流经地线的短路电流的总和。相应地,接地网的分流系数 K_{sg} 可表示为

$$K_{sg} = 1 - K_{sl} = \frac{I_g}{I_0 - I_N} \quad (2)$$

在实际工程中,真正引起危害、带来安全问题的是入地故障电流 I_g 。接地系统接地电阻的安全阈值由入地故障电流 I_g 决定;接地电压、网孔电压、接触电压、跨步电压等也与入地故障电流成正比^[9];因此主要关注入地故障电流 I_g 及其对应的分流系数 K_{sg} 。

由于工程设计中经常提供短路故障电流 I_0 ,一般不提供通过变压器中性点电流 I_N ,并且 I_N 的计算比较复杂。因此为了方便设计人员使用,研究中的入地电流分流系数与前述标准规定不同,直接定义 I_g/I_0 为接地网的分流系数。

2.3 分流系数计算原理

数值计算是分流系数最准确的计算方法,即建立接地系统、输电线路、架空地线等电气元件的等值电路,然后利用电磁暂态分析程序进行求解。文献[10]考虑了耦合因素和线路的互阻抗,采用集中参数等值电路计算分流系数。文献[11]提出了串级矩阵法,即将每个线路档距的阻抗矩阵串联起来,该方法能考虑所有的自阻抗、互阻抗和故障类型及位置。文献[12]提出了一种用简单方程组求解接地

网及杆塔电流的方法。文献[13]采用图解法求得了分流系数与接地电阻等参数的一系列关系曲线,可以根据这些曲线方便地得到分流系数。

电力系统短路电流计算可分为序分量法和相分量法^[14-15]。考虑线路换位、架空地线接地、各导线间互感等实际情况,故障条件下各相电量之间的关系是不对称的。因此,正序、负序、零序分量存在相互耦合,此时不能采用传统的序分量法进行求解。相分量法对各相导线、架空地线和电缆外皮等线路参数没有对称条件的约束,因此运用相参数较为直观,也更为精确。求解相参数电路可以归结为基本的电路求解问题。

电力系统所有元件都可以用广义导纳矩阵进行模拟^[16],因此可以将每个元件表示为

$$I_k = Y_k V_k - b_k \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: I_k 为元件终端电流向量; V_k 为元件终端的电压向量; Y_k 为元件的广义导纳矩阵; b_k 为独立电流源向量。式(3)的节点方程形式为

$$YV = b \quad (4)$$

式中: Y 由各元件的导纳矩阵组成的整个系统的导纳矩阵; V 为各节点的电压向量矩阵; b 为由各电流源构成的独立电流源,对于输电线路模型 $b=0$ 。

对式(4)进行修改即可模拟故障时的情况。如果在节点 i 和节点 j 之间发生故障,则应在故障 Y 的 $Y_{i,i}$ 和 $Y_{j,j}$ 元素中加上故障导纳 Y_f ,在 $Y_{i,j}$ 和 $Y_{j,i}$ 元素中减去故障导纳 Y_f 。求解式(4)的方程即可得到各节点的电压,代入式(3)可得到电流分布。

将导纳矩阵进行分块则能快速求解所需的电流,得到分流系数。包括故障电流在内的节点方程为

$$Y_N V = b_N + I \quad (5)$$

式中: Y_N 为整个系统的无故障元件的导纳矩阵; b_N 为整个系统无故障元件的独立电流源向量; I 为系统与故障元件接口处的电流向量。

系统中的元件可分为故障连接元件和其他元件两部分,因此可以将式(5)分解为

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:下标1表示与故障元件相连接的元件;下标2表示系统其余元件; I_1 为与故障元件相连接的系统终端处的电流向量。式(6)可以转换为

$$Y_e V_1 = b_e + I_1 \quad (7)$$

式中: Y_e 为除了故障元件外的整个系统的等效导纳

矩阵 b_e 为等效独立电流源,即

$$Y_e = Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21} \quad (8)$$

$$b_e = b_1 - Y_{12}Y_{22}^{-1}b_2 \quad (9)$$

通过这种转换可以将多元件系统等效为一个元件。在此基础上可以求出接地系统的接地电压和从变电站接地网流入大地的电流,进而计算分流系数。

3 福州站分流系数与短路入地电流计算

变电站内部发生短路时,其分流系数是由系统中的电流分布决定的,因而其中影响分流系数的相关参数如下:变电站接地网的接地电阻、杆塔接地装置的接地电阻、地线自阻抗、相线自阻抗、相线和地线间的互阻抗以及从母线看入系统的等值阻抗。变电站和杆塔的接地电阻是影响分流系数的重要因素,研究中作为主要变化参数进行分析。

3.1 福州站分流系数计算

由于线路杆塔接地电阻可能有变化,将线路杆塔接地电阻分别取 10 Ω、15 Ω、25 Ω 和 35 Ω,计算不同变电站接地电阻下,不同短路侧的短路电流分布和分流系数,结果如表 4 至表 7 所示。

表 4 杆塔接地电阻为 10 Ω 时地线分流系数

接地电阻/Ω	500 kV 侧短路时 地线分流系数	1 000 kV 侧短路时 地线分流系数
0.5	0.550	0.547
1	0.584	0.581
1.5	0.616	0.614
2	0.645	0.642
3	0.697	0.695
4	0.738	0.736

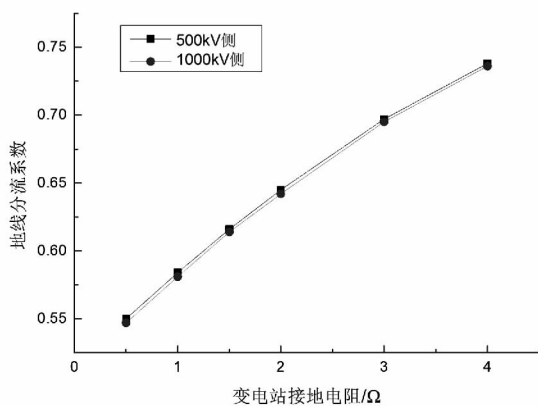


图 4 杆塔接地电阻为 10 Ω 时地线分流系数

由图 4 可见,随着变电站接地电阻的增大,500 kV 侧和 1 000 kV 侧的地线分流系数基本呈线性增长,且 1 000 kV 侧的分流系数略大于 500 kV 侧。

表 5 杆塔接地电阻为 15 Ω 时地线分流系数

接地电阻/Ω	500 kV 侧短路时 地线分流系数	1 000 kV 侧短路时 地线分流系数
0.5	0.548	0.545
1	0.582	0.579
1.5	0.614	0.611
2	0.643	0.640
3	0.694	0.692
4	0.735	0.733

表 6 杆塔接地电阻为 25 Ω 时地线分流系数

接地电阻/Ω	500 kV 侧短路时 地线分流系数	1 000 kV 侧短路时 地线分流系数
0.5	0.546	0.543
1	0.579	0.576
1.5	0.611	0.608
2	0.640	0.637
3	0.691	0.688
4	0.732	0.729

表 7 杆塔接地电阻为 35 Ω 时地线分流系数

接地电阻/Ω	500 kV 侧短路时 地线分流系数	1 000 kV 侧短路时 地线分流系数
0.5	0.543	0.540
1	0.576	0.573
1.5	0.608	0.605
2	0.637	0.634
3	0.687	0.685
4	0.728	0.726

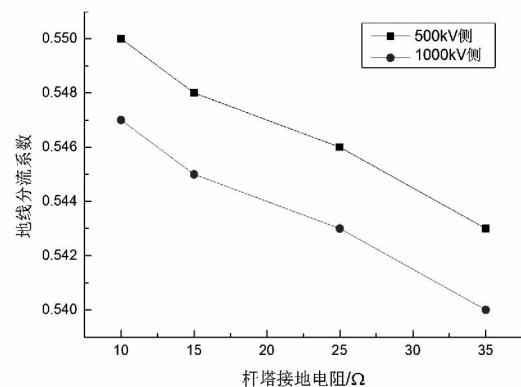


图 5 变电站接地电阻为 0.5 Ω 时地线分流系数

由计算结果可以看出,随着变电站接地电阻的增加,地线分流系数逐渐增大(0.55~0.75);而从图 5 可以看出,随着杆塔接地电阻的增加,地线分流系数逐渐减小,但变化不大(0.550~0.544,500 kV 侧;0.547~0.540,1 000 kV 侧)。500 kV 侧短路和 1 000 kV 侧短路时的地线分流系数差别较小。

3.2 福州站短路入地电流计算

考虑最普遍的单相短路情况进行计算,1 000 kV 侧单相短路电流为 24.1 kA,500 kV 侧单相短路电流为 57.19 kA。由于 500 kV 侧短路和 1 000 kV 侧短路时的地线分流系数差别不大,则考虑最危险情况,应使用 500 kV 侧单相短路电流 57.19 kA 分析实际最大入地电流,且地线分流系数为杆塔接地电阻 10 Ω 时的结果,短路入地电流计算结果如表 8 所示。

表 8 变电站短路入地电流随接地电阻的变化

接地电阻/Ω	最大入地电流/kA	接地电压/kV
0.5	25.74	12.87
1	23.79	23.79
1.5	21.96	32.94
2	20.30	40.60
3	17.33	51.99
4	14.98	59.94

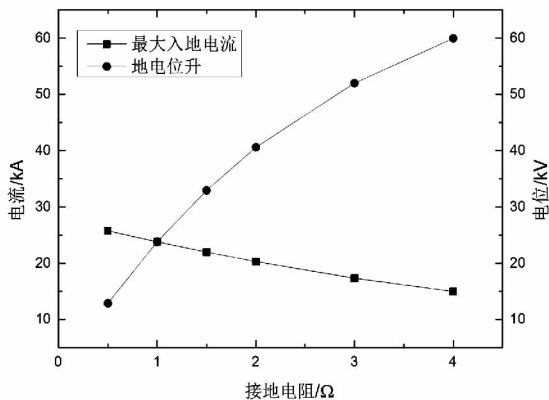


图 6 变电站短路入地电流随接地电阻的变化

由图 6 可见,随着变电站接地电阻的增大,短路最大入地电流逐渐减小,而接地电压则逐渐增大,且这两种变化趋势逐渐趋于平缓。因此,在实际工程变电站接地系统设计中,不能只关注分流系数(最大入地电流),必须同时考虑接地电阻对接地电压的影响,对变电站进行合理的降阻设计,有效降低接地电压,从而提高变电站安全性。

4 结 论

前面系统地研究了变电站站内故障时短路电流的分布和分流系数的计算,并给出了适用于工程实际的变电站分流系数的定义。在此基础上介绍了分流系数数值计算方法中经典的矩阵法。基于以上理论分析,以福州特高压 GIS 变电站为例,计算了福州站发生站内短路故障时的分流系数、短路入地电流和接地电压,分析了变电站分流系数的多种影响因

素。结果表明:

1) 变电站分流系数由系统中的电流分布决定。影响分流系数的因素有变电站接地网的接地电阻、杆塔接地装置的接地电阻、地线自阻抗、相线自阻抗以及架空地线的电气参数等。

2) 变电站和杆塔的接地电阻是分流系数的重要影响因素,地线分流系数随着变电站接地电阻的增大而增大,随着杆塔接地电阻的增大而减小。500 kV 侧和 1 000 kV 侧短路时地线分流系数差别较小。

3) 随着变电站接地电阻的增加,最大入地电流明显减小,接地电压却逐渐增大,且这两种相反的变化趋势逐渐趋于饱和。因此有必要对变电站进行合理的降阻设计。

参考文献

- [1] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 中国电力企业联合会. GB 50065-2011 交流电气装置的接地设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [3] 曹炜,王永生,张文青,等. 电力系统短路电流直流分量及其对断路器开断能力的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 283-288.
- [4] 李谦,蒋愉宽,肖磊石,等. 变电站内短路电流分流系数实测和分析[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2060-2065.
- [5] Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for Safety of AC Substation Groundings[S]. New York, USA: IEEE, 2000.
- [6] 何金良,张波,曾嵘,等. 1 000 kV 特高压变电站接地系统的设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 7-12.
- [7] 文习山,胡建平,唐炬. 复杂电力网络短路电流分布及地网分流系数[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2233-2240.
- [8] 吴锦鹏,张波,蒋愉宽,等. 基于相分量模型的变电站短路电流分流系数计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 122-130.
- [9] 陆家榆,庞廷智,薛辰东,等. 城区变电站地电位模拟测试研究[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 57-61.
- [10] Endrenyi J. Analysis of Transmission Tower Potentials during Ground Faults[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86(5): 1274-1283.

(下转第 72 页)

竞价价差将逐渐缩小,未来售电公司购售电业务的核心将是精准的负荷预测与合理的报竞价策略。一方面,大部分售电市场都采用了严格的偏差电量考核机制,售电公司负荷预测准确率将直接影响其经营收入;另一方面,中国将于2018年初步建立现货市场,这对售电公司基于电价预测的报竞价策略的专业技术实力提出了更高的要求。

1) 由于售电公司所管辖的负荷数量相对较少,负荷间通常没有大电网负荷的抵消效应,利用历史数据递推法进行负荷预测精度较差,只能通过深入地掌握特定负荷的生产、生活模式,从中挖掘出未来的负荷需求。电力咨询企业通过发挥资源整合的优势,在深入分析售电公司所代理的客户用电行为特性的基础上,提供高精度负荷预测服务。

2) 售电公司报竞价策略的关键是预测市场出清电价,为此售电公司须尽量获取所有参与集中竞价交易的发电公司与售电公司信息,包括发电公司能耗与报价模型、机组出力范围、运行小时数,售电公司成本与报价模型等。电力咨询企业可开发具备电价预测、报竞价策略分析等高级应用功能的软件,充分考虑市场主体的报价利润空间,分析得出发电公司和售电公司的模拟竞价交易数据,从而仿真得到市场出清价以及在此基础上制定合理的售电公司报竞价策略。

5 结 语

电力咨询企业长期从事发电和电网设计,具有较丰富的经验储备、较全面的技术底蕴和较完善的实际操作能力。面对售电侧改革推进,还需顺势而

(上接第26页)

[11] Sebo S A. Zero - sequence Current Distribution along Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems ,1969 88(3) : 910 - 919.

[12] Dawalibi F. Ground Fault Current Distribution between Soil and Neutral Conductors [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems ,1980 99(2) : 452 - 461.

[13] Garrett D L ,Myers J G ,Patel S G. Determination of Maximum Substation Grounding System Fault Current Using Graphical Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,1987 2(3) : 725 - 732.

[14] 姜彤,白雪峰,郭志忠,等. 基于对称分量模型的电力系统短路故障计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2003 23(2) : 50 - 53.

变,不断开拓创新。未来密切关注综合能源服务,加强与金融、法律的跨界融合,探索大数据技术、区块链技术、人工智能技术在其间的应用,积极开拓售电市场全方位咨询业务。

参考文献

[1] 刘继春. 电力市场技术支持系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[2] 徐毅. 新电力体制改革下的售电公司经营探讨[J]. 轻工科技, 2016(3) : 130 - 131.

[3] 胡晨, 杜松怀, 苏娟, 等. 新电改背景下我国售电公司的购售电途径与经营模式探讨[J]. 电网技术, 2016, 40(11) : 3293 - 3299.

[4] 包强, 王晓雯. 市场竞争环境下售电业务发展方向探索[J]. 电力需求侧管理, 2015(4) : 48 - 51.

[5] 段银斌. 市场化售电主体运营模式及关键业务研究[J]. 电力需求侧管理, 2016(3) : 41 - 459.

[6] 曹重. 南方电网开展综合能源服务的实践及成效[J]. 电力需求侧管理, 2016(3) : 1 - 4.

[7] 王俊, 张纯淳, 曾鸣. 大型发电企业构建售电平台的初步设想[J]. 企业改革与管理, 2017(1) : 217 - 218.

[8] 沈红宇, 陈晋, 归三荣, 等. 新一轮电力改革对电网企业配电网规划的影响与对策[J]. 电力建设, 2016, 37(3) : 47 - 51.

[9] 罗智, 宋炜. PPP 模式在增量配电网领域将大有可为[J]. 中国投资, 2017(2) : 82 - 85.

作者简介:

武云霞(1981), 高级工程师, 从事调度自动化和电力市场工作;

余 熙(1963), 教授级高工, 主要从事电网系统二次规划工作;

廖劲波(1964), 教授级高工, 主要从事调度自动化、电力系统规划工作。

(收稿日期: 2017 - 06 - 27)

[15] 黄锐峰, 李琳. 新的基于相分量的变压器模型及其在统一广义双侧消去法中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004 24(7) : 188 - 193.

[16] Meliopoulos A P , Webb R P , Joy E B , et al. Computation of Maximum Earth Current in Substation Switchyards [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems ,1983 102(9) : 3131 - 3139.

作者简介:

杨凌霜(1990), 助理工程师、硕士, 主要研究方向为变电站接地技术;

邹家勇(1982), 高级工程师、硕士, 主要研究方向为变电站接地技术、电磁场理论。

(收稿日期: 2017 - 06 - 27)