

配电网无功及三相不平衡综合补偿仿真系统设计与应用

随着节能减排和供电质量要求的提高，配电变压器低压侧无功集中补偿装置大量投入运行，规划与运维人员需要评估装置投运后的技术和经济效益。准确的评估方法需要通过潮流计算完成，由于实施前的电网状态数据已无法获取，因此在充分研究配电网三相潮流计算理论的基础上，研究分析了无功补偿控制逻辑，并利用矢量分析法，分析了相间补偿对平衡三相有功电流和补偿容性电流的作用。设计开发了一套配电网三相潮流计算与无功补偿仿真分析系统，选取某地区代表性配电线路，对其无功补偿的技术和经济效益进行了计算。实践表明，该仿真系统能够为配电网节能核算提供有效手段，还可为配电网无功电压管理及设备选型投资提供指导。

王德金¹ 党成斌² 颜 勇³ 张 东¹ 郭 健⁴/1.北京许继电气有限公司
2.国网陕西省电力公司渭南供电公司 3.国网山东省电力公司寿光市供电公司
4.国网陕西省电力公司西安供电公司

0 引言

为了提高配电系统的功率因数，降低线损，提升电能质量，通常在配电变压器低压侧采用并联电容器装置进行集中补偿，它是电网节能改造中最常见的技术措施^[1-2]，电网企业投入大量资金进行规划、建设与运维，对于无功补偿项目实施后的节能和电能质量提升效果，亟需一套准确测量和评估的方法。文献[3]提出了利用神经网络算法的无功及三相不平衡电容器综合补偿投切逻辑，通过仿真程序验证了算法的可行性，仿真结果只针对无功补偿安装点的实施效果进行了分析，未考虑安装点对配电系统的整体影响。文献[4]通过无功经济当量法估算无功补偿的节电量，此方法的无功经济当量是通过统计得到的经验值，

对不同网络结构和参数的配电线路适用性不强。

无功补偿装置投运前后引起配电线路拓扑参数的变化，由于项目实施前的电网状态已无法还原，数据不能直接测量，因此精确的无功补偿实施效果需通过潮流计算的方法^[5]。本文从整个配电系统的角度，以配电网三相潮流计算为基础，考虑台区无功补偿装置投切逻辑和投切后三相负荷转移，研究开发了基于Matlab的配电网无功及三相不平衡综合补偿的仿真与分析系统（以下简称“综合补偿仿真系统”），全面分析了无功及三相不平衡补偿对整个配电网的影响，该系统为台区无功补偿项目的综合效益测算提供了有效手段。

1 无功及三相不平衡综合补偿

1.1 补偿方式和接线方式

在正常运行状态下，电力系统中所接入的电气负荷基本上以感性负荷为主，所以在进行无功补偿时，以补偿容性无功为主。在接线方式方面，由于低压电器基本以三相平衡负荷和单相负荷为主，所以无功补偿装置亦分为三相平



王德金/高级工程师

关键词/Keywords

配电网 ·
三相潮流计算 ·
无功补偿 ·
三相不平衡 ·
节能仿真系统 ·

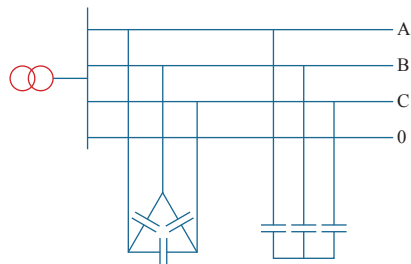


图1 三相共补与分补相结合电容器 Δ -Y的接线

衡补偿和单相分相补偿,其对应的电容器接线方式为:△形三相平衡接线和Y形相对地接线^[6]。

传统的低压无功补偿装置补偿方式一般为三相共补、单相分补以及共补与分补结合,该补偿方法虽然可以补偿无功,但无法对三相不平衡度进行调节。

1.2 相间补偿模型

由于单相负荷在三个相线上功率分配的不均匀性和运行的不同时性,造成三相电流的不平衡和各相功率因数的不一致,所以需要采用相间补偿的方法,即将电容器跨接在两个相线之间,以平衡三相电流^[7]。台区无功及三相不平衡综合补偿装置采用“三相共补+分相补偿+相间补偿”的接线方式,达到既补偿无功,又调节三相不平衡的目的。

三相不平衡调节的基本原理^[8]推导过程如下。假设a、b相间跨接电容器容量为 C_{ab} ,如图2所示。

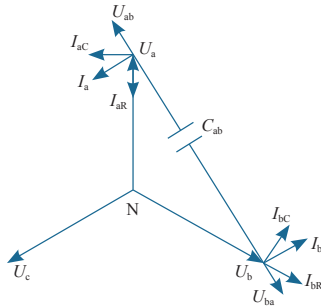


图2 a、b相间跨接电容矢量图

假设三相电压幅值 U 相等,相位相差为 120° ,则三相电压分别为 $\dot{U}_a = U \angle 0^\circ$ 、 $\dot{U}_b = U \angle -120^\circ$ 和 $\dot{U}_c = U \angle 120^\circ$,a、b相的线电压 $\dot{U}_{ab} = \sqrt{3}U \angle 30^\circ$ 。

电容 C_{ab} 在a相产生的电流 $\dot{I}_a$ 超前线电压 $\dot{U}_{ab}$ 为 90° ,即 $\dot{I}_a = \frac{C_{ab}}{\sqrt{3}U} \angle 120^\circ$ 。

$\dot{I}_a$ 可以分解为 $\dot{I}_{aC}$ 和 $\dot{I}_{aR}$,分别为

$$\dot{I}_{aC} = \frac{C_{ab}}{2U} \angle 90^\circ \quad (1)$$

$$\dot{I}_{aR} = \frac{C_{ab}}{2\sqrt{3}U} \angle 180^\circ \quad (2)$$

从式(1)可见, $\dot{I}_{aC}$ 为超前 $\dot{U}_a$ 90° 的容性电流,从而补偿了a相部分的无功功率;从式(2)可

见, $\dot{I}_{aR}$ 与 $\dot{U}_a$ 方向相反的有功电流 I_{aR} ,这表明a相有功电流的减小,从而转移了a相部分的有功功率。

故补偿的a相无功功率 Q_{Ca} 为

$$Q_{Ca} = I_{aC} U_a = \frac{C_{ab}}{2U} U = \frac{C_{ab}}{2} \quad (3)$$

补偿后a相转移的有功功率 P_{Ca} 为

$$P_{Ca} = I_{aR} U_a = \frac{C_{ab}}{2\sqrt{3}U} U = \frac{C_{ab}}{2\sqrt{3}} \quad (4)$$

同理,电容补偿的b相无功功率和转移过来的有功功率分别为

$$Q_{Cb} = I_{bC} U_b = \frac{C_{ab}}{2} \quad (5)$$

$$P_{Cb} = I_{bR} U_b = \frac{C_{ab}}{2\sqrt{3}} \quad (6)$$

因此,在a、b相之间跨接电容不但补偿了a、b相的无功功率,同时可以将一部分有功功率从a相转移到b相,使得a相有功负荷减少,b相有功负荷增加。

2 仿真系统设计

2.1 系统结构图

针对配电系统台区无功及三相不平衡综合补偿效果的计算,提出并设计了“综合补偿仿真系统”,系统结构如图3所示^[9]。

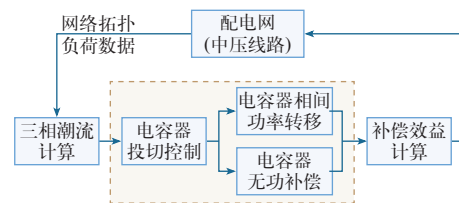


图3 系统结构图

“综合补偿仿真系统”实现了三相潮流计算、电容器投切控制、电容器投切后负荷补偿(转移)计算和补偿前后效益计算四项主要功能。系统读取网架和台区三相负荷数据后,进行三相潮流计算,得到节点电压、支路电流等状态数据,根据电容器投切控制算法,判断投入/切除的电容器组,最后计算电容器投切后的电网三相负荷变化量。对于补偿后各断面电能质量等技术

指标的改善,可通过对配电变压器配置电容器和未配置电容器两种状态的潮流计算结果进行对比,对于节电量的计算可通过逐个时刻点的计算累积获得。

在仿真过程中详细数据流转过程如图4所示,描述如下。

- 1) 设定系统的各参数基准值,包括电压、电流、容量、阻抗和导纳。
- 2) 程序自动读取网络的拓扑关系、线路和变压器规格参数和三相负荷,并标么化。
- 3) 设定电容器的初始状态,起始时刻全部电容器均未投入。
- 4) 对于第1个时刻,由于电容器均未投入,故直接进行三相潮流计算,得到电网运行状态;
- 5) 对于第 i ($i > 1$) 时刻,根据上一(即 $i-1$)时刻电容器投切状态,计算变压器补偿或切除后的负荷。
- 6) 对 i 时刻断面进行三相潮流计算,得到电网运行状态。
- 7) 对该运行状态,判断是否满足电容器组投切控制逻辑。
- 8) 如果不满足,则进入步骤5)。

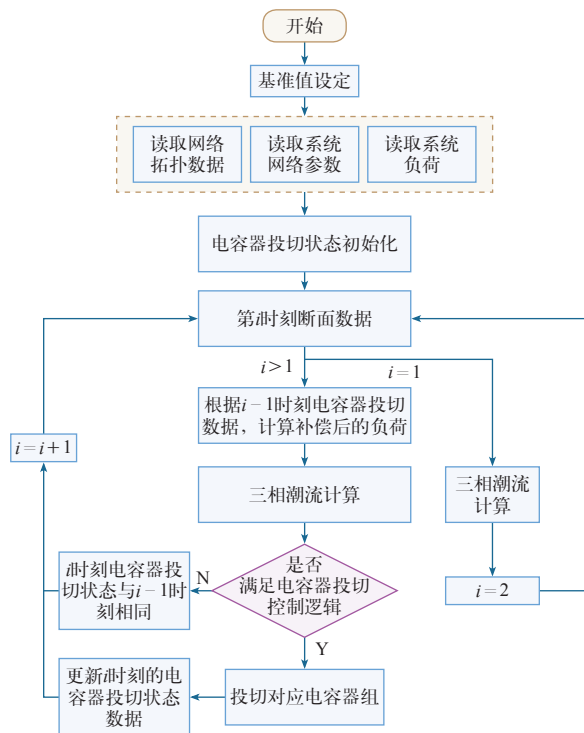


图4 主程序计算流程图

9) 如果满足,则更新第 i 时刻电容器投切状态数据,然后进入步骤5)。

10) 直至所有时刻计算完毕,程序停止。

2.2 三相潮流计算

配电网多为辐射状,前推回代法比较适合,具有计算速度较快、收敛性好和占用内存少等优点,能够满足配电网实时潮流计算的要求^[10-11]。

本文的潮流计算采用前推回代法,计算的对象涵盖10 kV配电线路、10/0.4 kV配电变压器和0.4 kV负荷。由于采用的是配电变压器低压侧负荷,潮流计算时需考虑配电变压器损耗,在拓扑分析时将配电变压器等效成一条支路,根据文献[12]将其等效至高压侧,因此需要在原有拓扑中增加一个节点。令根节点为已知,其三相电压幅值和相角在松弛节点,初始化所有节点电压等于根节点电压,算法步骤^[13]如下。

- 1) 输入节点和支路数据,给定各节点电压的初值,令 $k=1$ 。
- 2) 深度优先搜索重新编号节点和支路并确定支路的首末节点。
- 3) 按照支路编号由大到小的顺序,回推计算各支路电流,对负荷计算各相有功和无功功率。
- 4) 按照支路编号由小到大的顺序,前推计算各节点电压。
- 5) 计算第 k 次与第 $k-1$ 次迭代各节点电压差的模值,若最大值小于给定的门槛值,计算各支路电流和功率,结束;否则, $k=k+1$,转向步骤3)。

2.3 电容投切控制

低压配电系统中无功控制策略的原则为:当以电容器作为调整线路电压手段时,不得向线路倒送无功功率;电压无功控制策略以电压和无功功率为控制目标,对电容器应遵循循环投切的原则。

本文选用的电容器无功补偿包含三种补偿类型,即单相补偿、三相补偿和相间补偿,每一种补偿都有对应的电容投切策略,装置控制器采用的是无功优化与低电压治理综合控制的一体化策略。控制器实时采集系统电压和无功电流,通过精确跟踪计算,采用多种策略综合控制,对各组

电容器循环不重复式自动投切，先投先切。对三相、单相和相间电容器能够分别进行无功优化及协调控制，同时解决配电台区低功率因数和低电压问题^[14]。三种补偿方式的投切控制策略如表1所示。

表1 无功补偿装置投切控制策略

补偿类型	投入	切除
单相补偿	$Q_X \geq 1.2Q_{CX}$	$Q_X \leq -0.1Q_{CX}$
	且 $U_X \leq 235\text{ V}$	或 $U_X > 235\text{ V}$
三相补偿	$Q_{A+B+C} \geq 1.2Q_{CS}$	$Q_{abc} \leq -0.1Q_{CS}$
	且 $U_X \leq 235\text{ V}$	或 $U_X > 235\text{ V}$
相间补偿	$\varepsilon U_2 \geq 2\%$	$\varepsilon U_2 \leq 2\%$
	且 $U_X \leq 235\text{ V}$	或 $U_X > 235\text{ V}$

表1中， U_X 、 Q_X 和 Q_{CX} 为X相电压、无功负荷和无功补偿电容器组容量； Q_{A+B+C} 、 Q_{CS} 为三相无功负荷之和、三相无功补偿电容器组容量； εU_2 为电压负序不平衡度。

3 工程应用

以某地区10 kV馈线的年最大负荷日为例进行分析，该馈线是94节点系统，线路的网络接线如图5所示，线路总长为36.6 km，装接54台配电变压器（考虑配电变压器损耗时，则需要将其等效成一条支路，则节点增加54个，即148节点），主干线型号为LGJ-120，日最大负荷为5 763 kW，装接配电变压器总容量为10 065 kV·A，台区无功补偿装置17套，总容量为1 379 kvar，投资额为59.5万元。

无功补偿的配置情况，如表2所示。

3.1 节电量

选取馈线年最大负荷日进行仿真分析，以1 min为时间间隔提取有功、无功负荷。

通过仿真计算得到馈线日供电量为11.62万kW·h，日线损电量为4 809 kW·h，线损率为5.1%，日节电量为1 505 kW·h，电价按0.5元/kW·h计算，日节约电费约为752元。分设备类型来看，具体损耗数据如表3所示。

由表3可以看出，无功补偿的降损效果主要体现在线路部分，线路部分节电量为1 375 kW·h，占总降损量的91%，变损降低相对较小。值得注意的

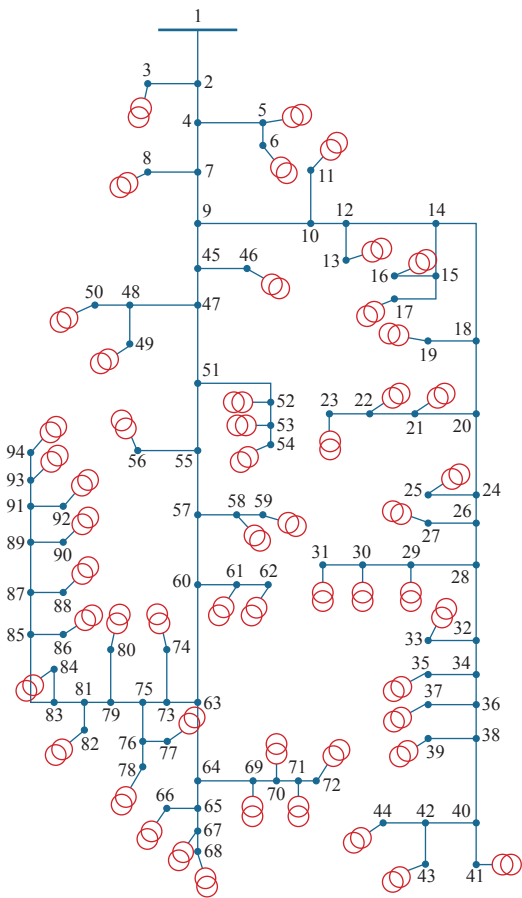


图5 某配电系统图

表2 无功补偿装置配置信息

编号	变压器 所属节点	变压器 末节点	额定容量 /kV·A	电容器配置容量 /kvar
1	23	105	200	54
2	27	107	250	80
3	29	108	400	115
4	31	110	200	80
5	39	114	500	150
6	41	115	200	80
7	43	116	200	54
8	44	117	200	54
9	54	123	400	115
10	62	128	200	54
11	66	129	200	54
12	68	131	200	54
13	70	133	250	80
14	71	134	250	80
15	78	138	250	80
16	82	140	400	115
17	90	144	250	80

表3 无功补偿前后日电量损耗

(单位: kW·h)

时间	线路损耗	变压器		总损耗
		铜损	铁损	
补偿前	4 956	832	527	6 314
补偿后	3 581	691	537	4 809

是, 变压器铁损不降反而略有上升, 这是由于无功补偿提升了配电变压器电压导致的。

3.2 补偿装置利用率

统计17套装置的容量利用率^[15], 如图6所示。

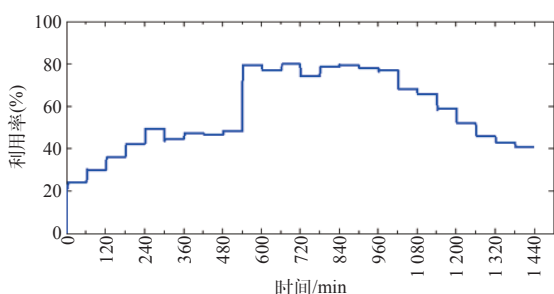


图6 无功补偿设备容量利用情况

由图6可以看出, 补偿装置总体利用率较高, 最高利用率80%左右, 说明补偿装置布点和型号选取是合理的。

对于单个配电变压器的无功补偿情况, 选取节点28的电容器进行说明, 如图7所示。

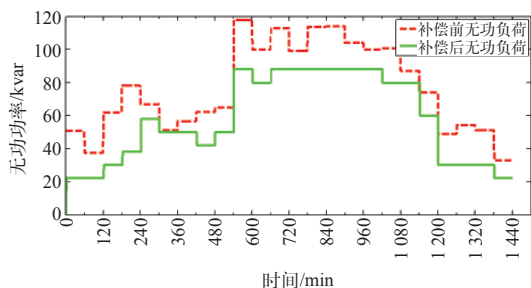


图7 节点28补偿前无功负荷与补偿负荷

由图7可以看出, 补偿量大小最主要的影响因素是无功负荷, 同时也受负荷的均衡分布、电压等影响, 如电压高于限值时无论缺多少无功, 电容器都不会投入。

3.3 线损率

补偿前后线损率的变化分时刻来看, 如图8所示。

由图8可以看出, 无功补偿前系统平均线损率

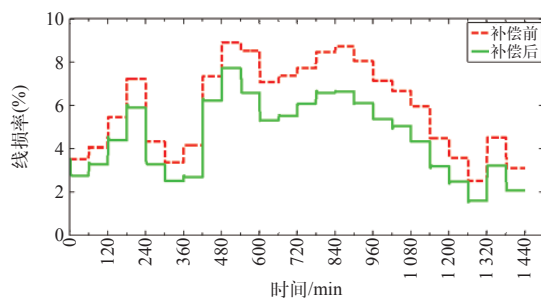


图8 无功补偿前后馈线线损率

为6%, 无功补偿后线损率降低至4%。

3.4 功率因数

补偿前后首节点的功率因数变化如图9所示。

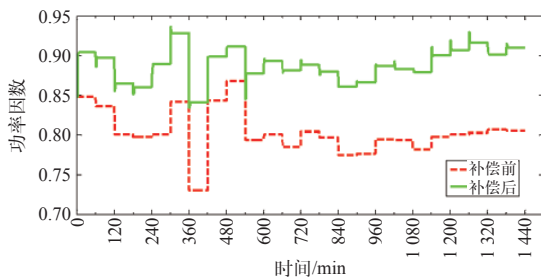


图9 补偿前后首节点功率因数改善情况

由图9可以看出, 无功补偿对功率因数提升效果非常明显, 基本上达到0.85以上, 与无功补偿容量利用率高是吻合的, 这完全得益于无功补偿的大量投入。

3.5 电压

选取10时的各节点电压改善情况进行说明, 如图10所示。

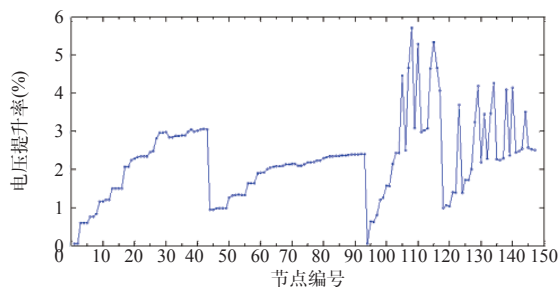


图10 10时各节点电压提升率

由图10可以看出, 对于10 kV节点 (即节点1~94) 的电压提升最高约0.03% (3 V), 配电变压器低压侧节点 (节点95~145) 电压提升效果相对10 kV节点更明显。

对于单个配电变压器低压侧的三相电压变化

情况,选取节点28为例进行说明,如图11所示。

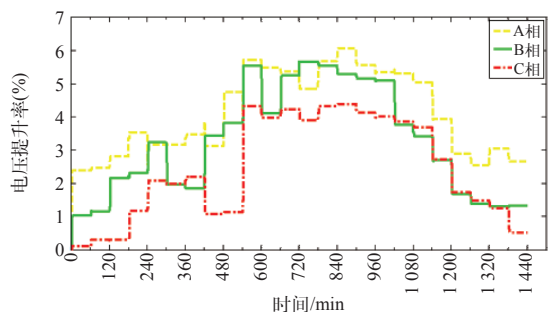


图11 节点28各时刻电压提升率

由图11可以看出,对于该变压器低压侧的电压提升率最高约6%,即13 V左右。

3.6 电压三相不平衡度

对于单个配电变压器的三相电压不平衡度改善情况,选取节点28为例进行说明,如图12所示。

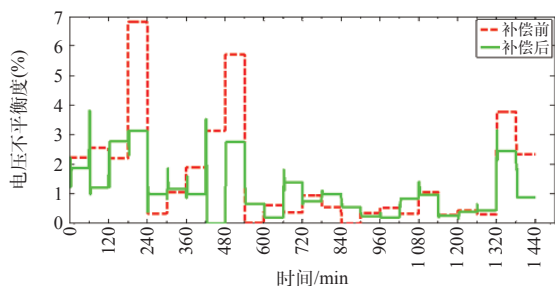


图12 节点28三相电压不平衡度改善

由图12可以看出,三相不平衡度获得了显著改善,最大值由7%降低至3%左右。

4 结束语

利用“综合仿真系统”对具有代表性的配电系统进行仿真计算,准确测算出了台区无功和三相不平衡补偿的节能和电能质量治理效果,通过对数据的积累与分析,将为工程改造项目的效益评估提供可靠依据,从而提高项目实施前规划方案的合理性和实施后效益评估的准确性,便于合同能源模式下的节能项目投资收益核算。该仿真系统还适用于变压器和线路改造措施的节能量计算,并可为无功补偿装置的电容器分组和控制逻辑设计的合理性提供检验手段。

参考文献

[1] 董佳. 配网无功优化及节能分析研究 [D]. 北京:

华北电力大学, 2016.

[2] 林海雪. 电力系统的三相不平衡 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[3] 李心广, 赖声礼, 秦华标, 等. 电网的无功及三相不平衡综合补偿研究 [J]. 电网技术, 2001, 25 (10): 30-33.

[4] Q/GDW 11036—2013 并联无功补偿装置节约电力电量测量与验证规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[5] 王振宇, 肖楚鹏, 邱泽晶, 等. 电网侧无功补偿节能量测量计算方法研究 [C]. 2013全国用电与节电技术研讨会, 2013: 77-82.

[6] 汪蕾. 配变三相不平衡全电容调节补偿的研究 [J]. 江苏电机工程, 2011, 30 (6): 30-33, 37.

[7] 刘勇, 杨仁刚, 冯小明. 三相不平衡电流补偿控制器的设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (4): 70-72.

[8] 王永忠, 陈杭, 周道娟. 智能三相不平衡负荷调节和无功补偿系统的设计应用 [J]. 低压电器, 2012 (24): 46-50.

[9] 李辉, 马飞, 张浩, 等. 三相四线制D-STATCOM/HESS系统在配电网中的应用及其仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (14): 107-114.

[10] 李佩杰, 罗翠云, 白晓清, 等. 一种求解多相混合配电网潮流的扩展序分量法 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (3): 15-23.

[11] 孟晓丽, 唐巍, 刘永梅, 等. 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (13): 45-51.

[12] 廖怀庆. 配电网三相不对称系统潮流计算的数学模型与计算方法 [D]. 南京: 东南大学, 2000.

[13] 刘雅静, 杨明皓. 配电网三相潮流计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14 (1): 59-63.

[14] 郭秀钦, 郭大庆, 张永新, 等. 配电网节能降耗优化改造方案的研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35 (2): 43-49.

[15] 胡壮丽. 配电网设备利用效率评价体系研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.

(收稿日期: 2016-12-03) EA