

配电网台区低电压治理策略研究

刘文松¹, 李煜², 彭中山¹, 皇甫晨晨¹, 顾鑫¹

(1. 江苏宏源电气有限责任公司, 江苏 南京 211103;

2. 国网江苏省电力有限公司南京市江宁区供电公司, 江苏 南京 211103)

摘要: 为了解决配电网低电压问题, 针对低电压具体产生机理进行分析, 差异化进行多种治理策略设计。基于目前已有的研究, 在设计低电压治理策略时, 对常用的三种低电压治理方案的关键技术进行梳理和分析, 尤其对结构拓扑、控制策略、补偿方式和模型预测等方面进行了归纳和讨论。针对三种低电压治理方式的工程应用进行数据验证及仿真分析。最后就低电压治理方式及应用前景进行了总结和展望。

关键词: 低电压治理; 自耦; 电压源换流器; 储能系统

Research on low voltage management strategy in distribution network area

LIU Wensong¹, LI Yu², PENG Zhongshan¹, HUANGFU Chenchen¹, GU Xin¹

(1. Jiangsu Hongyuan Electric Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing Jiangning District Power Supply Company, Nanjing 211103, China)

Abstract: In order to solve the problem of low voltage in the distribution network, the specific mechanism of low voltage generation is analyzed and designs multiple differentiated treatment strategies is designed. Based on the existing research, the key technologies of the three commonly used low-voltage treatment schemes are sorted out and analyzed, especially the structure topology, control strategy, compensation method, model prediction and other aspects are summarized and discussed. For the engineering application of the three low-voltage treatment methods, data verification and simulation analysis are carried out. Finally, the article summarizes the low-voltage treatment methods and application prospects.

Key words: low voltage management; autotransformer; voltage source converter; energy storage system

0 引言

近年来, 用户对供电品质和可靠性的要求越来越高。低品质供电会导致电网线损增加、设备故障和停电事故等问题, 同时影响用户的生产和生活。如果电压过低, 在影响居民用电的同时, 可能导致三相负荷的运行状况发生变化, 进而导致谐波、零序电流以及零序电压的出现。这将造成电网中的无功负荷大幅度上升, 进一步造成线路的损失。因此, 如何有效地处理台区末端的低电压, 已成为当前电能质量治理的一大挑战。

1 配电网台区低电压亟待解决

1.1 配电网台区低电压产生的原因

由于末端负荷过大, 以及台区供电半径过长^[1], 使得配电网台区出现低电压的情况^[2], 主要原因包括线路无功功率不足、台区内感性负荷占比过高等因素。当线路中存在大量的非线性负荷时, 往往还会产生谐波等电能质量污染问题。因此, 解决这些问题已成为当前配电网台区的一项重中之重的任务^[3]。

1.2 配电网台区低电压的治理技术

传统的配电网台区低电压治理主要采用以下手段。

针对台区无功功率问题^[4-5]，一般选择在用户侧安装无功补偿装置，以起到降低无功电流并缓解低电压的作用。此外，还可以采取人工切换负荷调整，平衡三相负荷，或者在线路末端安装三相不平衡补偿装置^[6-7]，以达到更好的效果。

配电变压器台区供电半径过长是当前低电压治理的痛点问题，主要措施：①调整台区网架机构，缩减台区供电半径；②在线路中串联自耦调压器，抬升末端电压，缓解低电压问题^[8]；③增加储能设备，在用电高峰期输出功率，缓解线路用电需求^[9]。

2 配电网台区低电压问题治理策略

2.1 基于自耦原理的低电压治理策略

2.1.1 典型拓扑分析

典型拓扑图如图1所示。

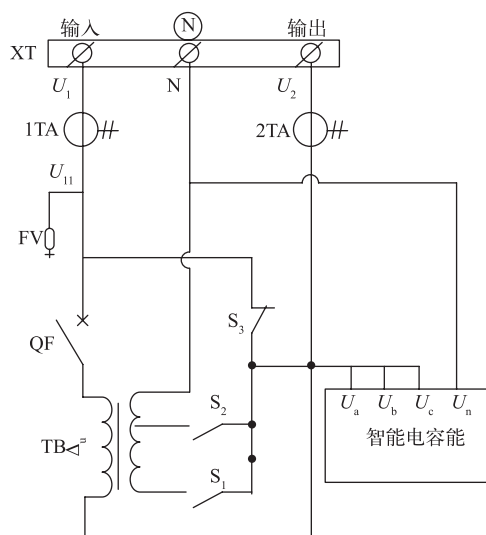


图1 基于自耦原理的典型拓扑图

Fig. 1 Typical topology map based on autocoupling principle

串联自耦变压器主要是当 U_1 的输入电压低于预设值时，电压补偿模块会根据实际情况调整 U_2 的输出电压，以确保负荷的正常运行。此外，还会投入智能电容器，以减少由于无功电流而导致的线路压降。

2.1.2 控制方式

具体逻辑判断：

1) 如果互感器检测到的电压超过5%，那么就无须对其进行电压补偿，此时 S_1 和 S_2 的开关将保持常开，此时变压器的二次端将断开。

2) 如果互感器检测到的电压低于标准值的5%，就会向自耦变压器发出闭合信号，以此来控制开关的闭合。变压器所处节点的电压有效值与标准值的比值为 $\Delta U\%$ ，具体的触发规则为 $90\% \leq \Delta U\% \leq 95\%$ ， S_2 动作； $85\% \leq \Delta U\% \leq 90\%$ ， S_1 动作。

2.1.3 安装位置

首先，应当对需要进行电能质量治理的配电网台区进行实地勘查，以确定负荷高峰期电压幅值低于标准电压5%的区域，并且确定其安装位置，以确保线路上所有节点的电压符合以下规定

$$u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max} \quad (1)$$

式中， $u_{\min}=0.95 U_N$ ； $u_{\max}=1.05 U_N$ 。

2.2 基于电力电子的低电压治理策略

2.2.1 典型拓扑分析

典型拓扑图如图2所示。

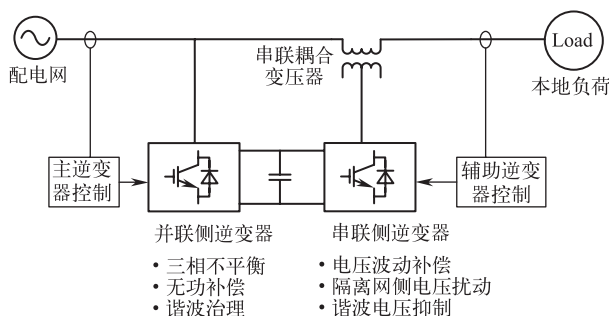


图2 基于电力电子的典型拓扑图

Fig. 2 Typical topology diagram based on power electronics

基于电力电子的低电压治理策略中，采用两个电压源换流器背靠背组成。采用串联逆变器，能够有效地改变负荷端的电压，达到稳定电压的目的。这种方法既能够避免电压的剧烈变化，也能够有效地抑制电压的谐波、三相失配和降低功耗。通过并联侧逆变器，可以有效地解决负荷侧电流的电力需求，包括三相不平衡补偿、无功补偿以及抑制低频电流的技术。

2.2.2 模型推导

本文选用三相两电平的拓扑结构, 为便于分析, 以并联侧逆变器为例, 如图3所示。

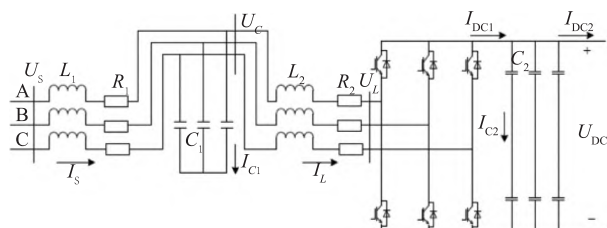


图3 并联侧逆变器典型拓扑图

Fig. 3 Typical topology diagram of parallel inverter

图3中, L_1 、 L_2 为滤波电感; R_1 、 R_2 为线路等效电阻; C_1 为并联侧逆变器滤波电容; C_2 为直流母线电容。

其中, 6个开断模式中, “1”表示每相上半桥臂导通和下半桥臂关断; “0”表示的情况相反。可能出现的情况见表1。

表1 VSC 开断模式

Tab. 1 VSC disconnection mode

开断模式	A 相	B 相	C 相
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	0
4	0	1	1
5	1	0	0
6	1	0	1
7	1	1	0
8	1	1	1

依据基尔霍夫电压定律^[10], 将 S_n ($n=a、b、c$) 作为三相变换器的开关函数, 并将其应用于电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 的数学模型中, 各表达式为

$$R_2 I_L + L_2 \frac{dI_L}{dt} = U_C - U_L \quad (2)$$

$$R_1 I_S + L_1 \frac{dI_S}{dt} = U_S - U_A \quad (3)$$

$$C_1 \frac{dU_C}{dt} = I_S - I_L \quad (4)$$

$$I_{DG1} = S_n I_L \quad (5)$$

$$C_2 \frac{dU_{DC}}{dt} = I_{DC2} - I_{DC1} \quad (6)$$

对上述方程进行 $d-q$ 变换, 可以得到坐标系下VSC状态方程为

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{C-d}}{dt} = I_{S-d} - I_{L-d} + \omega U_{C-q} \\ C_1 \frac{dU_{C-q}}{dt} = I_{S-q} - I_{L-q} + \omega U_{C-d} \end{cases} \quad (7)$$

$$L_2 \frac{dI_{L-d}}{dt} = -R_2 I_{L-d} + \omega L_2 I_{L-q} + U_{C-d} - U_{L-d} \quad (9)$$

$$L_2 \frac{dI_{L-q}}{dt} = -R_2 I_{L-q} + \omega L_2 I_{L-d} + U_{C-q} - U_{L-q} \quad (10)$$

$$L_1 \frac{dI_{S-d}}{dt} = -R_1 I_{S-d} + \omega L_1 I_{S-q} + U_{S-d} - U_{C-d} \quad (11)$$

$$L_1 \frac{dI_{S-q}}{dt} = -R_1 I_{S-q} + \omega L_1 I_{S-d} + U_{S-q} - U_{C-q} \quad (12)$$

$$I_{DC1} = \frac{3}{2} (S_d I_{L-d} + S_q I_{L-q}) \quad (13)$$

根据式 (6) 和式 (13) 可知, 变流器有功电流 I_{L-d} 及无功电流 I_{L-q} 均可影响母线电压 U_{DC} 。

2.2.3 控制策略

从VSC的整体结构和功能应用来说, 由外环控制器和内环控制器组成的双闭环控制系统泛用性最高。外环控制器主要针对功率设定值进行处理。内环控制器可对内环电流进行快速跟踪调节, 其动态响应速度较快, 且具有良好的鲁棒性。

在VSC的控制策略中, 外部控制环由有功和无功两种类型的元件组成, 而内部控制器根据外部控制器提供的 $d-q$ 轴电流参数实现对换流器的精确跟踪^[11]。

(1) 外环控制器设计

PQ 控制是指变流器所接系统的频率和电压在允许范围内运行时, 控制变流器输出的有功功率 P_{act} 和无功功率 Q_{act} 分别由设定值 P_{set} 、 Q_{set} 得到。 PQ 控制包括功率外环和电流内环, 其外环控制框图如图4所示。

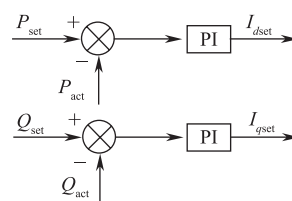
图4 $P-Q$ 外环控制框图Fig.4 $P-Q$ outer loop control block diagram

图4中,根据给定功率计算得到实际输出的有功和无功功率,再分别与设定的有功、无功参考值进行运算后,得到误差信号,经过PI环节进行修正,最终得到电流内环的控制参考信号计算式为

$$\begin{cases} I_{dset} = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (P_{set} - P_{act}) \\ I_{qset} = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (Q_{set} - Q_{act}) \end{cases} \quad (14)$$

式中, I_{dset} 为内部的电压控制的基准值; P_{set} 、 Q_{set} 、 P 、 Q 为用来衡量有功、无功的参照值及实际值; k_p 、 k_i 为用来表示环节的比例以及相应的积分系数。

(2) 内环控制器设计

通过功率外环运算得到 I_{dset} 和 I_{qset} , 与经过 d - q 变换后台区三相电流得到的实际值作差, 再将差值送入PI进行比例调节, 完成对电流的解耦, 并与通过 d - q 变换得到的三相电压实际值 U_d 和 U_q 作差, 最终得到轴的输出电压参考值 U_{dset} 和 U_{qset} , 整体内环控制框图如图5所示。

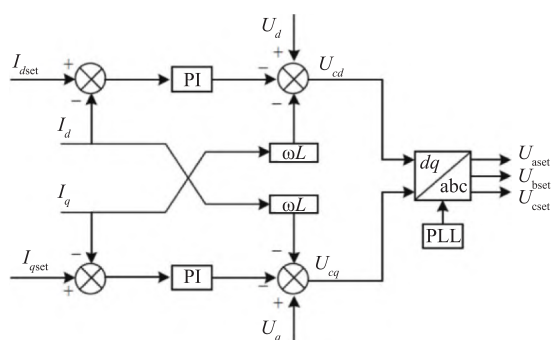


图5 内环电流控制器控制框图

Fig. 5 Control block diagram of inner loop current controller

2.2.4 配置原则

在实际变流模块、补偿变压器的选择上, 建议遵循以下原则:

1) 采用由三只单相变压器组成的补偿变压器。

2) 变流模块单相额定容量与单相补偿变压器铁心容量相一致, 避免变流器或补偿变压器的容量浪费。

3) 变流模块电压调节范围为0~230 V, 因

此, 单相补偿变压器二次侧的额定电压为230 V。

4) 负荷侧电压理论调节范围受补偿变压器一次、二次绕组电压比决定, 而实际的电压调节能力受补偿装置容量、负荷容量及负荷的功率曲线影响。

5) 补偿装置补偿容量、负荷容量及调压范围的大致估算计算公式为

$$\frac{kU_2}{U} = \frac{S_{补}}{S} \quad (16)$$

式中, U 为一次系统额定电压; k 为补偿变压器的一、二次匝数比; U_2 为补偿变压器二次绕组施加的最大电压, 或变流器模块的最大输出电压; S 为负荷或线路容量; $S_{补}$ 为补偿变压器容量。

通过式(16)确定了需要调节的电压范围与线路或负荷的容量, 可以大致估算出需要的补偿变压器或变流模块容量; 反之, 知道线路或负荷容量以及补偿变压器容量, 也能大致确认装置的电压调节范围。

2.3 基于储能技术的低电压治理策略

2.3.1 典型拓扑分析

储能系统典型拓扑图如图6所示。

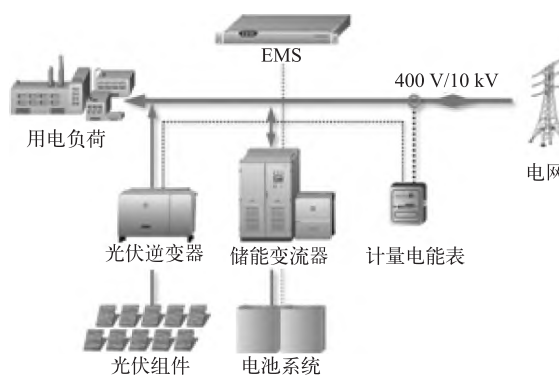


图6 储能系统典型拓扑图

Fig. 6 Typical topology diagram of energy storage system

储能通过以太网通信接入微电网控制器, 可根据不同自然条件下负荷情况, 以及电压及功率偏差进行出力调节。

根据不同的运行条件, 储能电池的SOC和充放电功率的数学模型可以表示为^[12]

$$SOC = SOC_0 + \int \frac{-P_B \times 100}{P_E \times 3600} dt \quad (17)$$

$$P_B = \begin{cases} P_F \left(1 - \frac{P_{Fmax} + \Delta P}{P_{Fmax} - P_{Fmin}} \right) \\ -P_S \left(1 - \frac{P_{Smax} - \Delta P}{P_{Smax} - P_{Smin}} \right) \\ 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, SOC_0 为电池初始状态; P_E 为储能额定容量; ΔP 为负荷预测偏差; P_{Fmax} 为储能最大放电功率; P_{Fmin} 为储能最小放电功率; P_{Smax} 为储能最大充电功率; P_{Smin} 为储能最小充电功率; P_F 为储能额定放电功率; P_S 为储能额定充电功率。

2.3.2 充放电控制策略

目前储能系统在实际应用时,通常采取满功率充放电控制策略,即在允许范围内,满功率补偿。将补偿功率 P_B 作为额定运行功率与负荷预测误差的最大值,依据负荷预测曲线设定。 $\Delta P < 0$ 时,储能放电, $P_B > 0$; $\Delta P > 0$ 时,储能充电, $P_B < 0$ 。

储能充放电控制策略详述如下。

1) 如果电网运行符合以下标准,那么储能系统就会发电。

$$\begin{cases} -P_{Fmax} \leq \Delta P \leq -P_{Fmin} \\ SOC_{min} < SOC < SOC_{max} \end{cases} \quad (19)$$

式中, SOC 为电池载荷量; SOC_{min} 与 SOC_{max} 分别为电池载荷量最小值和最大值。

2) 储能充电条件为

$$\begin{cases} P_{Smin} \leq \Delta P \leq P_{Smax} \\ SOC_{min} < SOC < SOC_{max} \end{cases} \quad (20)$$

3) 运行状态满足以下任意一个条件,储能系统将不动作。

$$-P_{Fmin} \leq \Delta P < P_{Smin} \quad (21)$$

当电网功率偏差超出储能系统的放电区间时,储能系统将不动作

$$\begin{cases} -P_{Fmax} \leq \Delta P < P_{Fmin} \\ SOC \leq SOC_{min} \end{cases} \quad (22)$$

当电网功率偏差超出储能放电区间,而电池 SOC 低于设定的最低标准时,储能系统不动作。

$$\begin{cases} P_{Smin} \leq \Delta P \leq P_{Smax} \\ SOC \geq SOC_{max} \end{cases} \quad (23)$$

通过调整储能系统的活跃程度,确定多种不

同的停止运行条件,既可以防止由于频繁的充放电操作而对电池使用寿命造成影响,也可以减少储能变流器开关元件的损耗,同时能有效地阻止过载运行带来的电池性能下降。

3 工程应用

3.1 基于自耦原理的低电压治理应用

某台区变压器容量100 kV·A,联结组别为Dyn11,未配无功补偿装置。该支线总长为1.8 km,设备安装位置距末端用户约0.9 km,支线导线规格为LGJ-35,额定载流量为105 A。低电压治理前数据见表2。治理后数据见表3。

表2 台区低电压治理前

Tab. 2 Before low voltage control in the substation area

	相电压 /V	有功功率 / kW	无功功率 / kvar	末端电压 /V
A相	184.44	9.55	0.28	170.1
B相	256.36	1.51	-0.25	-
C相	234.63	2.37	0.56	-

在该支线约1/2处,距离变压器约0.9 km位置进行装置安装。

表3 台区低电压治理后

Tab. 3 After low voltage control in the substation area

	相电压 /V	有功功率 / kW	无功功率 / kvar	末端电压 /V
A相	215.15	8.19	-0.28	199.1
B相	255.85	3.87	0.64	-
C相	252.5	1.58	0.5	-

低电压治理监测图如图7所示。

A相电压由196.44 V提升至215.15 V, A相末端电压由173.1 V升至194.1 V,此时末端用户空调系统能够正常启动并运行。

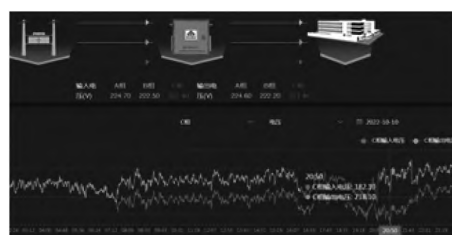


图7 低电压治理监测图

Fig. 7 Low voltage governance monitoring diagram

3.2 基于电力电子的低电压治理应用

某台区变压器容量 $200\text{ kV}\cdot\text{A}$ ，联结组别为Dyn11。该支线总长为 1.6 km ，设备安装位置距末端用户约 0.8 km ，支线导线规格为LGJ-35，额定载流量为 105 A 。

在该支线约 $1/2$ 处进行电力电子装置安装，线电压由 $369.7\sim 399.3\text{ V}$ 波动提升至 410 V 稳压。如图8所示。

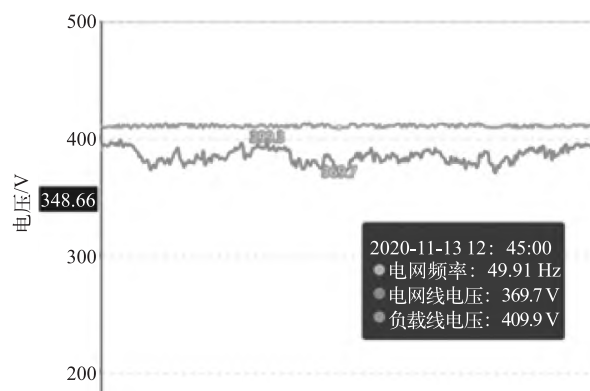


图8 低电压治理监测图

Fig. 8 Low voltage governance monitoring diagram

3.3 基于储能装置的低电压治理应用

某台区的配电变压器容量为 $200\text{ kV}\cdot\text{A}$ ，其中负荷高峰期的最大占比达到了75%。目前，台区线路导线规格为BCVV-70，线路供电半径为 1.73 km ，而且线路的终点电压是 169 V 。储能容量选择配电变压器容量的10%，按 $20\text{ kW}\cdot\text{h}$ 进行考虑，将线路分为六等分进行仿真模拟，其中节点N1为配电变压器出口，不作接入考虑。

节电电压见表4。各节点电压趋势图如图9所示。

表4 节点电压
Tab. 4 Node voltage

	单位: (pu)					
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
N1	1.00	0.949	0.835	0.796	0.779	0.724
N2	1.00	0.978	0.957	0.935	0.924	0.912
N3	1.00	0.981	0.961	0.941	0.930	0.916
N4	1.00	0.983	0.965	0.950	0.940	0.931
N5	1.00	0.983	0.964	0.951	0.946	0.937
N6	1.00	0.982	0.963	0.955	0.949	0.943

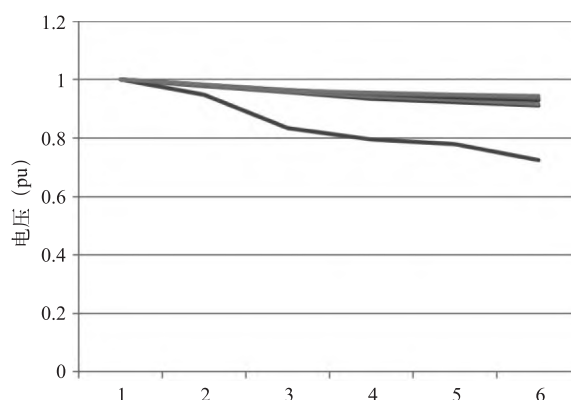


图9 各节点电压趋势图

Fig. 9 Voltage trend diagram of each node

根据上述仿真结果可以发现，在低压配电变压器台区进行储能系统建设，可有效地补偿线路电压，缓解线路供载压力，并针对线路中的无功情况进行补偿。同时针对不同安装位置，对于末端负荷电压情况影响也不尽相同，安装位置越接近用电负荷，对于居民用电提升效果幅度越明显。

4 结束语

通过采用基于自耦原理的低电压治理策略，可以有效地解决由于线路长度和线径细度导致的台区线路末端低电压问题。通过逐步提升电压，实现三相电压的均衡，从而确保整条线路的中端和后端的电能质量。与传统的低电压治理方法相比，这种策略适用性、经济性较好。

通过采取电力电子技术的低电压治理策略，可以有效地抑制电网中的无功损耗，调节电网中的三相电压平衡，并且可以作为新能源消纳和微电网能量平衡的重要参考。

采用基于储能技术的低电压管控策略，相比传统的新建配电变压器技术，可以更有效地节约电网投资，为解决农村地区复杂的电能质量问题提供有效的参考。

参考文献

- [1] 王金丽, 段祥骏, 李云江, 等. 配电网低电压产生原因与综合治理措施[J]. 供用电, 2016, 33(7): 8-12.

- [2] 黄桂兰, 林韩, 蔡金铨. 农村配电网低电压治理措施研究[J]. 电气技术, 2015(11): 64-67, 82.
- [3] 李睿. 低压配电网电压质量问题分析与治理[J]. 电工技术, 2020(1): 110-112.
- [4] 金立军, 安世超, 廖黎明, 等. 国内外无功补偿研发现状与发展趋势[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 463-465.
- [5] 李家翔, 谢高硕, 朱成, 等. 配电线路无功补偿技术降损研究与实践[J]. 电工技术, 2022(6): 117-119.
- [6] 方恒福, 盛万兴, 王金丽, 等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2185-2193.
- [7] 林志雄, 陈岩, 蔡金铨, 等. 低压配电网三相不平衡运行的影响及治理措施[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 63-67.
- [8] 黄嘉楠, 向小民, 邢彧. 基于低电压治理的配电网优化策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 200-206.
- [9] 全慧, 杨水丽, 李相俊, 等. 改善配电网末端电压的分布式储能容量配置研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(10): 64-70.
- [10] 沈国桥, 徐德鸿. LCL滤波并网逆变器的分裂电容法电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 36-41.
- [11] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [12] 赵永生, 赵爱华, 夏宗杰, 等. 配电网闭环运行管理评估方法研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(18): 132-136.
- [13] 孙伟卿, 朱聪, 薛贵挺. 基于储能系统的低压配电网三相不平衡治理方法研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(5): 75-81, 86.

作者简介

刘文松(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、一二次融合技术等。
(收稿日期: 2023-07-25)