

DSTATCOM 配置与整定的多目标协调优化

赖宇阳¹, 肖勇¹, 郑楷洪¹, 毕京虎², 王清², 张勇军³

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080; 2. 烟台东方威思顿电气股份有限公司, 山东 烟台 264000;
3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 配电网具有供电半径长、结构复杂的固有特征, 强波动性负荷以及分布式电源的增加进一步加剧了配电网潮流的不确定性, 恶化配电网的电压质量, 因此有必要合理配置 DSTATCOM 以提升配电网经济效益、保证电压质量, 进而提高对分布式电源的消纳能力。提出一种配电网 DSTATCOM 配置与整定的多目标协调优化方法, 在优化配置过程中考虑 DSTATCOM 的运行与参数整定问题。优化模型涉及系统网损电量、设备总投资、设备闲置率以及 DG 弃发电量等多个目标, 基于 NSGA-II 求取帕累托解集并运用带权理想点法进行决策, 其突出特点在于能够综合考虑 DSTATCOM 的配置与运行, 通过 IEEE33 节点算例验证了该方法的有效性。

关键词: DSTATCOM; 配置; 整定; 多目标优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.007 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2020)01-0061-07

Multi objective coordinated optimization of DSTATCOM configuration and setting in distribution network

LAI Yuyang¹, XIAO Yong¹, ZHENG Kaihong¹, BI Jinghu², WANG Qing², ZHANG Yongjun³

(1. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China; 2. Yantai Dongfang Wisdom Electric Co., Ltd, Yantai 264000, China; 3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The distribution network has inherent characteristics of long supply radius and complex structure. With the increasing of strong wave from load and DGs, the uncertainty of distribution network power flow is also increased and might causes the voltage quality deterioration in the distribution network. Therefore, it is necessary to rationally configure the DSTATCOM to improve the economic benefit of distribution network, ensure the voltage quality, and improve the DG accommodation. In this paper, a multi-objective coordinated optimization method are proposed for the DSTATCOM configuration and its setting in distribution networks, which considers the operation of DSTATCOM and the parameters setting problem in the process of optimal configuration. For distribution networks with DG, the optimization model of target system involves losses, a total investment of equipment, equipment idle rate and abandoned power generation of DG. The Pareto solution sets are obtained based on the NSGA-II, and the weighted ideal point method is employed for decision-making. The outstanding characteristic of those methods is that it considers the configuration and operation of the DSTATCOM synthetically and the proposed method is verified by the example of IEEE33 bus sample system.

Key words: DSTATCOM; configuration; setting; multi objective optimization

配电网是电力系统的重要组成部分,作为最接近用户侧的末端环节,具有供电半径长、结构复杂的固有特征。随着现代工业中具有强波动性的新型负荷的增加,如电弧炉、中频炉等,以及分布式电源的并网,进一步加剧了配电网潮流的不确定性,恶化配电网的电压质量^[1-2]。

近年来供电企业为进一步提高配电网的供电能力与电压质量,全面解决配电网的薄弱问题,正在加大对配电网建设与改造的投资。而传统的配置电容器进行补偿的手段已无法较好地解决配电网电压质量问题。在电力电子技术发展的背景下,配电网静止同步补偿器(DSTATCOM)被应用于配电网节能与电压治理,DSTATCOM具有无功连续调节、快速的动态响应能力等优势。通过配置 DSTATCOM 还能够有效降低配电网损耗及提升 DG 消纳能力,促进节能减排,此外还兼具应对电压暂降等电能质量问题的潜在效益,随着 DSTATCOM 造价的下降在配电网中的应用会日益广泛^[3-5]。

针对 DSTATCOM 的配置已有学者开展了研究,做出了有益的探索。文献[6-7]针对单配置点的 DSTATCOM 容量配置进行了研究,其中文献[6]总结了数种 DSTATCOM 配置容量的实用方法,文献[7]引入资金运营理论提出了配电网抵御电压暂降所需 DSTATCOM 配置容量的计算模型。文献[8]提出了配电网中 DVR 和 DSTATCOM 的综合配置方法。而关于高压网络中 STATCOM 的配置问题。文献[9]针对变电站内固定电容器组容量及 STATCOM 容量的优化提出了配置方法。文献[10]建立综合考虑系统网损、电压水平、补偿费用的多目标优化模型,对 STATCOM 选址及容量进行优化,但以上分析未能考虑不同负荷水平下 STATCOM 所发挥的作用,大多基于单个场景的潮流分析,对运行效果的反映不够全面。

在配电网中合理配置 DSTATCOM 对提升配电网经济效益、保证电压质量、提高 DG 消纳能力具有现实意义。该文提出一种 DSTATCOM 配置与整定的多目标协调优化方法,优化模型充分考虑 DSTATCOM 的电压整定以及全天的运行效益,优化目标包括系统网损电量、设备总投资、设备闲置率以及 DG 弃发电量,基于 NSGA-II 求取帕累托解集并运用带

权理想点法根据规划部门的偏好进行决策,最终通过 IEEE33 节点算例验证该文方法的有效性。

1 DSTATCOM 应用分析

在配电网中配置 DSTATCOM 主要以无功补偿和电能质量控制为主要目标。可调节公共连接点处的电压幅值,有效解决电压偏差、电压波动等电压质量问题,具有诸多优势^[4]。

1.1 控制策略与整定分析

通常 DSTATCOM 采取斜率调节的方式^[3],根据并网点电压偏差成比例地调节输出电流。待整定参数包括参考电压以及斜率,采取斜率调节相比于定电压控制,不要求并网点电压恒定,允许电压偏差在允许范围内从而换取无功的减少,能够防止系统电压波动时,设备大幅度频繁调节的情况发生。参考电压主要影响系统的稳态运行点,而斜率则主要与暂态性能与调节能力有关。

由于在工程应用当中希望 DSTATCOM 安装地点的电压保持在参考电压附近,因此通常在潮流计算中可以把 DSTATCOM 并网的节点取定为 PV 节点^[5],也就是给定有功功率与节点电压,而无功功率则根据潮流收敛结果决定,若超出无功调节范围则退化为 PQ 节点,使无功按最大值输出。

1.2 配置点选择与容量设计

目前在配电网中配置点主要为规模较大的用户级微电网、分布式电源的公共连接点、长馈线末端或接近末端的关键节点,以及具有较严重的电能质量问题的工业负荷接入点^[4]。通常, DG 接入配电网的关键在于并网点的电压控制^[11],在 DG 并网点配置 DSTATCOM 不仅能够对系统的无功电压进行控制,同时还能提高 DG 的低电压穿越能力,对于含 DG 的配电网优先选择 DG 并网点作为配置点^[3-4]。

而容量设计方面,目前工程上主要有根据无功电量、冲击源的无功损耗、PCC 点电压波动限制^[6]、考虑抵御电压暂降风险减少用户损失等确定配置容量的方法^[7],但这些方法均针对单一配置点,缺乏系统层面的分析。随着 DSTATCOM 在配电网中将逐步被广泛应用,且多配置点间存在耦合关系,更需要从系统全局角度进行综合优化配置。

2 DSTATCOM 配置与整定优化

DSTATCOM 的配置与运行紧密相关,若待安装后再考虑运行问题与参数整定,可能无法充分发挥设备潜力。现阶段 DSTATCOM 的投资费用与传统无功补偿设备相比仍然较高,因此 DSTATCOM 的运行与参数整定问题需要在优化配置过程中加以考虑。该文提出 DSTATCOM 配置以及电压整定的多目标优化模型,基于 NSGA-II 以及带权理想点法进行模型的求解。

2.1 目标函数

以系统日网损电量、设备总投资费用、设备闲置率以及 DG 消纳能力作为优化目标。

1)网损电量。配电网的网损是反映配电网经济运行的重要指标,DSTATCOM 的合理配置可以利用动态无功补偿优化配电网潮流,降低功率传输过程中的网损,该文以典型日配电网的总网损电量来体现 DSTATCOM 配置方案下其连续长期运行所实现的降损效果。网损电量可表示为

$$f_1 = \sum_{t=t_0}^T P_{\text{loss}_t} \Delta t \quad (1)$$

式中 P_{loss_t} 为时段 t 内的网损; t_0 为初始时段; T 为调度运行周期,典型日以 24 h 为调度运行周期; Δt 为时间间隔,该文取为 1 h。

2)设备总投资费用。在保证获得较好调节效果的前提下尽可能减少投资费用同样是一个重要的优化目标。配置 DSTATCOM 的投资包含 2 个部分:配置点的固定投资(如安装费用、逆变器等);与容量相关的可变投资。假设系统中有 n 个待选配置点,投资费用表示为

$$f_2 = \sum_{k=1}^n a_k \times I_f + C_{\text{DS}_k} \times I_v \quad (2)$$

式中 a_k 为配置点 k 是否配置 DSTATCOM 的标识位,有配置取 1 反之取 0; C_{DS_k} 为配置点 k 所配置的 DSTATCOM 容量; I_f 为固定投资; I_v 为可变投资,表明单位容量的投资费用。综上, f_2 反映了系统中配置 DSTATCOM 的总投资费用。

3)设备闲置率。DSTATCOM 连续运行可能出现一天中某些时段输出较大而某些时段几乎不输出的情况,为避免设备配置容量的冗余或利用率低

下,定义设备闲置率作为目标函数,其表达式为

$$f_3 = 1 - \frac{\left(\sum_{k=1}^n \sum_{t=t_0}^T Q_{kt} \Delta t \right)}{\left(\sum_{k=1}^n C_{\text{DS}_k} T \right)} \times 100\% \quad (3)$$

式中 Q_{kt} 为配置点 k 在时段 t 内的无功输出情况, f_3 反映了配电网中配置的 DSTATCOM 全天运行下对设备容量的有效利用程度。该目标函数值越小,说明设备闲置容量越少,即设备利用程度越高。

4)DG 弃发电量。分布式电源接入配电网容易引起配电网电压质量恶化,从而制约配电网对 DG 的消纳,例如光伏出力较大的正午,负荷可能恰处于相对较低的状态,此类情况容易造成配电网局部过电压问题,若危及配电网安全则需要削减出力导致诸如弃光的问题,而 DSTATCOM 能够通过无功调节消除过电压问题,为了评估配置 DSTATCOM 后的 DG 消纳能力,定义目标函数表达式为

$$f_4 = \sum_{k=1}^n \sum_{t=t_0}^T P_{\text{cr}_{kt}} \Delta t \quad (4)$$

式中 考虑 DG 接入点作为 DSTATCOM 待选配置点^[3], $P_{\text{cr}_{kt}}$ 为配置点 k 在时段 t 内的 DG 弃发电功率, f_4 反映了配电网全天的总弃发电量。该目标函数值越小说明配电网中 DG 弃发电量越小,系统对 DG 的消纳能力越强。

2.2 约束条件

考虑配电网运行的物理特性、安全约束以及配置方案的科学性,该文优化模型包含以下约束条件。

1)潮流约束。各节点的功率方程:

$$\begin{cases} P_{is} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{is} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 P_{is} 、 Q_{is} 分别为节点 i 注入的有功与无功功率, G_{ij} 与 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵的实部与虚部, δ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的相角差。

2)节点电压约束。对于 10 kV 配电网,一般来说电压允许偏移为 $-10\% \sim +7\%$,故优化过程中节点电压需要满足

$$0.9 \text{ p. u.} \leq V_i \leq 1.07 \text{ p. u.} \quad (6)$$

3)配置容量约束。对单个配置点的最大配置容量进行限制,即单点配置容量不超过限值,约束为

$$C_{\text{DS}_k} \leq C_{\text{DS}_{\text{max}}}, k = 1 \sim n \quad (7)$$

式中 C_{DS_max} 为单个配置点配置容量最大值。

2.3 求解算法

在该文模型的基础上参考文献[11]的处理方式,考虑到 DSTATCOM 在配电网中的主要用途是提升电压质量,结合其斜率控制的特点就要求整定参考电压,从而利用 DSTATCOM 的调节作用使得并网点电压得以保持在合适的范围内。从实际运行经验来看,整定完参考电压等参数并投运后,在 DSTATCOM 后续运行过程中一般不会再频繁修改整定的参数,所以该文在优化配电网中 DSTATCOM 的配置容量的同时也将待整定的参考电压作为优化变量参与问题的优化求解,实现配置与整定方案的协调优化。

当待选配置点配置了 DSTATCOM,则在潮流计算中视为 PV 节点,需要给定整定的参考电压值,当然若超出调节范围则退化为 PQ 节点,而不配置的节点也仍视为 PQ 节点。

该文运用 NSGA-II 获取多目标优化问题的帕累托解集。凡是帕累托解集中的解都无法在不牺牲其余目标函数的前提下进一步优化任意一个目标函数。一般来讲,所求得的帕累托解集当中的解仍会有一些的数目,不方便直观进行决策。该文结合带权理想点法^[12]来辅助决策,带权理想点法具有简单直观的特点,通过设置权重体现用户偏好,从而实现最优配置方案的选取。

该文模型的 4 个目标均为最小化目标,因此以各目标的最小值为正理想点 $(f_1^+, f_2^+, f_3^+, f_4^+)$,反之为负理想点 $(f_1^-, f_2^-, f_3^-, f_4^-)$ 。根据式(8)将不同目标规格化,解决量纲问题,计算帕累托解集中各个解与理想点的加权距离。

$$\min F_d = \min \sum_{k=1}^4 \omega_k \left| \frac{f_k - f_k^+}{f_k^- - f_k^+} \right| \quad (8)$$

式中 ω_k 为各目标函数的权重,反映解与正理想点的各维度距离的贡献程度,各权重值 ω_k 需要满足

$$\sum_{k=1}^4 \omega_k = 1 \quad (9)$$

3 算例分析

采用该文提出的配电网 DSTATCOM 配置与整定的多目标协调优化方法对 IEEE33 节点标准系

统进行 DSTATCOM 的配置与整定优化,以验证该文模型与方法的有效性。

3.1 测试系统

在 IEEE33 节点配电网中选择节点 6、14、29 接入分布式光伏,接入容量分别为 0.5、1.5、1.5 MW,同时也作为 DSTATCOM 的待选配置点。网络中各支路参数与 IEEE33 节点配电网模型中参数一致,IEEE33 节点测试系统如图 1 所示^[13]。

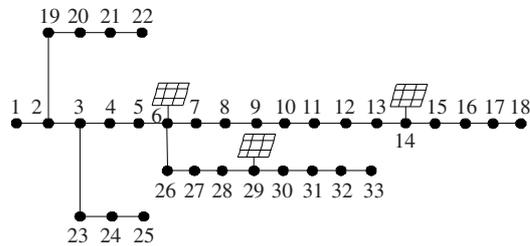
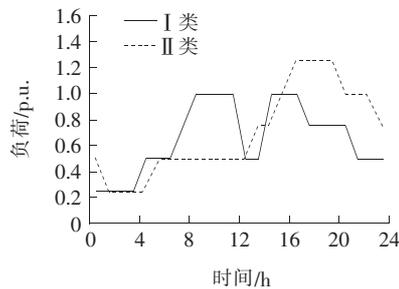


图 1 IEEE33 节点测试系统

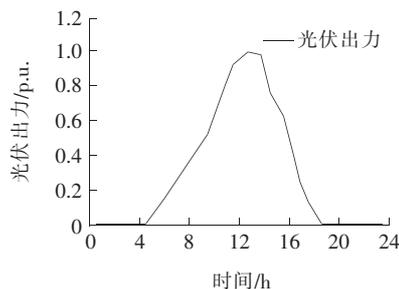
Figure 1 IEEE 33-bus system

该文选取典型日的负荷曲线,给定 2 类负荷变化规律曲线,I 类负荷呈现典型的双峰型,而 II 类负荷则为晚高峰型,如图 2(a)所示。光伏典型日出力曲线如图 2(b)所示。

图中曲线纵坐标均为 p. u.,其中各负荷的基准为 IEEE33 节点算例中各节点对应的负荷功率,光伏对应的基准为该节点光伏装机容量。测试系统中



(a) 负荷曲线



(b) 光伏曲线

图 2 负荷及光伏出力曲线

Figure 2 Load and PV output curve

各节点对应的负荷曲线类型如表 1 所示。

表 1 负荷曲线类型

Table 1 The type of load curve

| 负荷曲线 | 节点编号 |
|------|-----------------------|
| I 类 | 2~6,11~16,21~25,31~33 |
| II 类 | 7~10,17~20,26~30 |

3.2 结果分析

DSTATCOM 的容量各配置点的配置容量上限取 $C_{DS,max} = 1.5$ MVar; 固定投资 $I_f = 10$ 万元/配置点; 可变投资 $I_v = 5$ 万元/100 kVar; 考虑安全裕度, 各参考电压的整定区间取 $[0.95, 1]$, 以 0.005 p. u. 为步长; NSGA-II 算法的种群规模取 80, 进化代数取 100, 交叉与变异概率分别设置为 0.85 与 0.05。

由计算可知, 光伏接入之前系统日网损电量为 3 600.2 kW·h, 接入光伏后日网损电量 2 607.3 kW·h, 由于就地供给部分功率使得网损下降。而在未配置 DSTATCOM 的情况下, 系统电压存在部分越限问题, 假定光伏接入点电压高于 1.05 p. u. 时将会根据要求削减出力, 全天弃发电量将达到 958.05 kW·h。

1) 配置方案。

基于 NSGA-II 可求得最优解集, 给出部分代表解所对应的方案进行分析, 如表 2 所示, 各方案所对应的目标函数值如表 3 所示。

表 2 部分配置方案

Table 2 Part of the allocation scheme

| 编号 | 配置容量/MVar(整定电压/p. u.) | | |
|----|-----------------------|------------|------------|
| | 配置点 1 | 配置点 2 | 配置点 3 |
| 1 | 0.5(1.000) | 0.5(0.950) | 0.5(0.975) |
| 2 | 0.6(0.970) | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0.8(0.965) | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0.5(0.970) |

表 3 目标函数值

Table 3 Objective function value

| 编号 | $f_1/(kW \cdot h)$ | $f_2/万元$ | $f_3/\%$ | $f_4/(kW \cdot h)$ |
|----|--------------------|----------|----------|--------------------|
| 1 | 2 260.9 | 105 | 20.417 | 0 |
| 2 | 2 579.5 | 40 | 8.974 | 115.6 |
| 3 | 2 611.8 | 50 | 14.628 | 129.3 |
| 4 | 2 610.6 | 35 | 8.317 | 298.9 |

由表 2 可知其中方案 1 配置量较大, 在 3 个待选配置点均有配置 DSTATCOM, 在此情况下可以进一步降低网损, 同时弃光量减少到 0。而方案 2~4 各只在局部某一光伏接入点配置 DSTATCOM, 投资大大减少, 但相应的网损优化效果以及 DG 消纳能力方面不如方案 1。根据带权理想点法进行最优决策, 假定规划部门较关心网损、投资以及对 DG 的消纳能力, 因此将评估 4 个维度与理想点距离的权重设置为 $[0.3, 0.3, 0.1, 0.3]$, 可得最优方案为表中方案 2, 可见综合考虑多目标的影响, 方案 2 在各方面能够取得折中的效果, 在较低的投资费用下取得较为满意的效益。

以方案 2 为例, 总投资为 40 万元。假定电价以 0.5 元/(kW·h) 算, 通过降低网损以及减少弃光能够减少供电成本, 此外降低网损以及提高清洁能源的消纳能力还能产生环境效益, 即减少主网火电发电造成的排放, 保守估计单位电量排放费用以 0.1 元/(kW·h) 计, 设备运行期间每年由于折旧、维护等因素造成的费用以初始投资的 10% 计算, 经过测算只需 2.7 年即可回收投资成本。考虑 DSTATCOM 则造价还会进一步下降, 可见在配电网中合理配置 DSTATCOM 具有较好的经济性。

2) 电压质量分析。

补偿前配电网主干线(1~18 节点)各节点电压情况如图 3 所示。

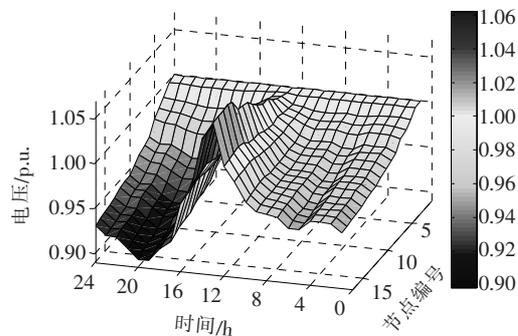


图 3 补偿前节点 1~18 的电压

Figure 3 Voltage of node 1 to 18 before compensation

由图 3 可知在没有配置 DSTATCOM 的情况下配电网电压由首端向末端逐渐下降, 负荷重时(如晚间 20:00 左右), 靠近末端的部分节点出现电压偏低甚至越下限的情况, 而光伏出力大时(如正午 12:00 左右), 光伏接入点附近出现电压偏高, 达

到 1.06 p.u. 以上,无法满足供电要求。

而根据最优方案配置 DSTATCOM 后,各节点电压情况如图 4 所示。通过对比可知,配置了 DSTATCOM 后,主干线各节点电压都得到明显改善,负荷重时由于 DSTATCOM 的无功调节,有效地支撑了该线路(节点 1~节点 17)末端的电压水平,而在光伏出力大时也同时消除了过电压问题,增强了配电网对光伏的消纳能力。且由于 DSTATCOM 的电压控制效果,从稳态角度能够保持邻近节点的电压相对稳定,全天电压变化平缓。

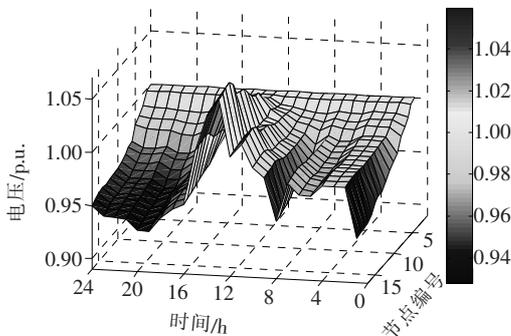


图 4 补偿后节点 1-18 的电压

Figure 4 Voltage of node 1 to 18 after compensation

3) 整定电压的影响分析。

由于该文方法兼顾配置容量与整定电压的优化,为验证整定值优化的有效性,就不同的整定电压对系统运行的影响进行分析。在所得方案 2 的基础上进一步调整 DSTATCOM 的整定电压值,不同整定电压下的配电网网损电量与各节点中最低电压值如表 4 所示。

表 4 不同整定电压下的对比

Table 4 Comparison of different setting voltage

| 整定电压 | 网损电量/(kW·h) | 最低电压/p.u. |
|------|-------------|-----------|
| 无配置 | 2 607.3 | 0.893 1 |
| 0.97 | 2 579.5 | 0.918 9 |
| 0.98 | 2 641.1 | 0.925 5 |
| 0.99 | 2 695.5 | 0.931 3 |

表中数据显示,整定电压的提高确实能够使得配电网整体的电压水平有所提升,但并没有办法降低网损,这主要是因为整定电压的提高导致 DSTATCOM 无功输出增加,出现了局部无功过剩而在线路上倒送情况,无功的流动引起线路损耗的加重,可见该文对电压整定的优化是有效的。

4 结语

在配电网中合理配置 DSTATCOM 对提升配电网经济效益、保证电压质量、提高 DG 消纳能力等方面具有现实意义。该文针对在配电网中多点配置 DSTATCOM 的情况,提出配置与整定的多目标协调优化方法,兼顾了 DSTATCOM 的选址定容以及参数整定。算例分析表明:该模型能够综合反映系统运行的经济性、配置方案的合理程度以及设备利用程度,通过该方法配置 DSTATCOM 能够在较低的投资费用下取得了较为满意的效益,同时通过合理整定电压也能够兼顾网损以及系统的电压水平,同时增强配电网消纳分布式电源的能力。算例结果验证了该文方法的有效性。

参考文献:

- [1] 杨江涛,刘佳,孙春顺,等. 计及分布式电源的配电网储能配置研究[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(1): 108-114.
YANG Jiangtao, LIU Jia, SUN Chunshun, et al. Research on energy storage configuration of distribution network considering distributed power supply[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(1): 108-114.
- [2] 高倩,朱佳明,林其友,等. 考虑孤岛供需波动的多 DG 配电系统可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(3): 136-142.
GAO Qian, ZHU Jiaming, LIN Qiyu, et al. Reliability evaluation of multi DG distribution system considering islanding fluctuation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(3): 136-142.
- [3] 魏承志,苏杰和,文安,等. 含 DSTATCOM 和分布式电源配电网的无功电压协调控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(9): 132-137+163.
WEI Chengzhi, SU Jiehe, WEN An, et al. Reactive voltage coordinated control for distribution network with DSTATCOMs and DGs [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9): 132-137+163.
- [4] 张玮亚,李永丽,孙广宇,等. 基于静止同步补偿器的主动配电网分区电压控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7): 1644-1656.

- ZHANG Weiya, LI Yongli, SUN Guangyu, et al. Zonal-voltage control for active distribution network based on distributed static synchronous compensator [J]. Proceedings of CSEE, 2015, 35(7): 1644-1656.
- [5] 吴忠强, 赵立儒, 贾文静, 等. 计及 DG 与 STATCOM 的配电网重构优化策略 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 111-116+122.
- WU Zhongqiang, ZHAO Liru, JIA Wenjing, et al. Optimal reconfiguration of distribution network with DG and STATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 111-116+122.
- [6] 曹华珍, 黄春艳, 张勇军. D-STATCOM 容量配置方法及其在配电系统中的应用效果分析 [J]. 电工电能新技术, 2015, 34(7): 69-74.
- CAO Huazhen, HUANG Chunyan, ZHANG Yongjun. D-STATCOM capacity allocation methods and analysis of application effect on distribution system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(7): 69-74.
- [7] 曹华珍, 莫一夫, 林小朗, 等. 基于资金运营理论的配电网 D-STATCOM 优化配置 [J]. 电气应用, 2015, 34(7): 34-38.
- CAO Huazhen, MO Yifu, LIN Xiaolang, et al. Optimal allocation of D-STATCOM based on the theory of capital operation [J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(7): 34-38.
- [8] 郑志宇, 李雅倩, 谢雪景, 等. 基于全寿命周期成本的电压暂降治理设备综合配置规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 128-134.
- ZHENG Zhiyu, LI Yaqian, XIE Xuejing, et al. Allocation plan of voltage sags mitigation devices based on life cycle cost [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 128-134.
- [9] 汪龙龙, 张兆君, 张鹏, 等. 变电站内无功设备容量配置方法研究 [J]. 智慧电力, 2018, 46(1): 51-56.
- WANG Longlong, ZHANG Zhaojun, ZHANG Peng, et al. Configuration method of reactive power capacity in substation [J]. Smart Power, 2018, 46(1): 51-56.
- [10] 张涛, 徐雪琴, 史苏怡, 等. 基于改进多种群量子粒子群算法的 STATCOM 选址及容量优化 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(S1): 75-81.
- ZHANG Tao, XU Xueqin, SHI Suyi, et al. Optimal location and parameter setting of statcom based on improved multiple population quantum particle swarm optimization algorithm [J]. Proceedings of CSEE, 2015, 35(S1): 75-81.
- [11] 刘泽槐, 翟世涛, 张勇军, 等. 基于扩展 QV 节点潮流的光储联合日前计划 [J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3435-3441.
- LIU Zehuai, ZHAI Shitao, ZHANG Yongjun, et al. A joint day-ahead scheduling for photovoltaic-storage systems based on extended QV bus-type power flow [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3435-3441.
- [12] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.
- YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [13] 隋兴嘉, 肖勇, 郑楷洪, 等. 光储与 DSTATCOM 协同运行及定容 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6): 150-157.
- SUI Xingjia, XIAO Yong, ZHENG Kaihong, et al. Coordinative operation and capacity allocation of photovoltaic-storage and DSTATCOM systems [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 150-157.