

考虑空间负荷布局的多电源配电网动态规划优化

岳园园¹, 张超², 袁性忠¹, 朱岸明², 黄宗君¹, 蒋勃², 张寓涵¹

(1. 国网陕西省电力公司经济技术研究院, 陕西 西安 710000;

2. 国网陕西省电力公司, 陕西 西安 710000)

摘要:多电源配电网空间负荷易出现过载现象, 导致配电网规划稳定性降低, 提出了一种考虑空间负荷布局的多电源配电网动态规划优化方法。根据多电源配电网的等效拓扑电路结构, 进行多电源配电网动态规划约束参数分析处理。结合空间负荷均衡节点, 根据线零模波速参数融合, 均衡调度空间负荷。采取有功无功协调控制, 进行传输时延和波阻抗等动态约束参数优化解析, 实现多电源配电网动态规划优化设计。实验结果表明, 考虑空间负荷布局的多电源配电网动态规划的输出参数稳态跟踪性能较好, 输出偏差较小, 规划用时更短, 并降低了规划成本, 提高了规划质量, 实际应用效果更好。

关键词:空间负荷布局; 多电源; 模糊增强; 配电网; 动态规划

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22973

Dynamic Planning Optimization of Multi-power Distribution Network Considering Spatial Load Layout

YUE Yuanyuan¹, ZHANG Chao², YUAN Xingzhong¹, ZHU Anming²,

HUANG Zongjun¹, JIANG Bo², ZHANG Yuhuan¹

(1. *Economic and Technological Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710000, Shaanxi, China*; 2. *State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710000, Shaanxi, China*)

Abstract: The spatial load of multi-power distribution network is easy to overload, which leads to the reduction of distribution network planning stability. A dynamic planning and optimization method of multi-power distribution network considering the spatial load layout was proposed. According to the equivalent topological circuit structure of multi-power distribution network, the constraint parameters of dynamic planning of multi-power distribution network were analyzed and processed. Combined with the spatial load balancing node, the spatial load was balanced and scheduled by fusing the zero mode wave velocity parameters of the line. Active and reactive power coordinated control was adopted to optimize and analyze the dynamic constraint parameters such as transmission delay and wave impedance, thus to realize the dynamic planning optimization design of multi-power distribution network. The experimental results show that the dynamic planning of multi-power distribution network considering spatial load layout has better output parameter steady-state tracking performance, smaller output deviation, shorter planning time, lower planning cost, higher planning quality and better practical application effect.

Key words: spatial load layout; multi-power; fuzzy enhancement; distribution network; dynamic planning

随着智能电网的建设,大量的分布式电源接入到配电网系统中,给配电网发展规划和运行规

划提出了更高的要求。研究多电源配电网的动态规划方法,通过负载均衡调度,进行多电源配

基金项目: 国网陕西省电力公司经济技术研究院科技项目(SGSNJY00ZJNS1900040);

陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2016JM5072)

作者简介: 岳园园(1992—),女,硕士,工程师,Email:qq351062689@163.com

通讯作者: 黄宗君(1979—),男,博士,教授级高工,Email:hj19798822@163.com

电网的优化线路传输和节点分布式控制,从而提高多电源配电网的动态规划和控制能力,相关的多电源配电网的动态规划方法研究受到人们的极大关注^[1]。

文献[2]提出了一种以解决现状电网问题为导向的配电网自动规划方法。首先利用配电网接线模式识别及潮流运算的结果对待规划电网中的典型问题进行识别;其次通过对规划中如线路安全载流量、配变容量等各类电网技术约束及其他普适的边界条件,如馈线挂接配变容量限制、负荷供电距离等进行抽象、量化形成了针对各类典型问题的方案自动生成方法;最后以中压线路重/过载问题及单辐射线路与首端环网线路改造问题为例,对所提自动规划方法进行了详细的说明与验证。文献[3]提出基于遗传算法的主动式配电网电源分区布点规划方法。综合考量网损、网络节点电压的总偏差和投资成本、潮流等关键技术,根据网损最小、投资成本最低、电压稳定性最强原则,建立目标函数,将潮流方程、线路传输功率、节点电压、接入分布式电源的总容量,反向潮流等作为目标函数的约束条件,引入遗传算法对目标函数进行求解,通过搜索寻优的方式找到主动式配电网电源分区布点规划的最佳方案,增强了节点电压稳定性,综合规划效果好。文献[4]建立了综合充电站,电动汽车(electric vehicle, EV)用户与配电网多方利益的快速充电站规划模型,考虑EV保有量增长的影响,同时计及EV增长率的不确定性,构建了2种EV充电站随机机会约束动态规划模型,并提出考虑充电需求空间分布的改进自适应遗传算法(improved adaptive genetic algorithm, IAGA)求解上述规划模型,通过一个实际算例验证了所提IAGA在求解充电站规划问题时的可行性与有效性,并对比分析了2种动态规划模型的规划结果。文献[5]提出了一种考虑电源和负荷时序特性的主动配电网网源协调双层规划模型。模型上层为规划层,以综合费用最小为目标,对线路的改造、分布式电源和补偿电容的选型、选址和定容进行决策;模型下层为运行层,以年运行费用、快速电压稳定性、用户用电习惯满意度等为目标。考虑分布式电源和负荷的波动性和不确定性,建立二者的时序模型。综合考虑分布式电源出力、需求响应和补偿电容投切,实现主动配电网的经济调度。

以上相关文献资料虽都对配电网规划进行了优化,但容易出现多电源配电网空间负荷过载现象,导致配电网的输出电压增益不高,而且配电网动态规划输出参数的稳态跟踪性能欠佳,输出偏差高,规划用时较长,输出稳定性和规划质量还有待进一步提高。

针对以上问题,本文提出一种考虑空间负荷布局的多电源配电网动态规划优化方法。首先构建多电源配电网动态规划的分布电容电流参数分析模型,结合集中参数线路模拟方法进行多电源配电网动态规划过程中的约束参量分析,然后构建多电源配电网动态规划的空间负荷的负载均衡控制模型,通过线路两端行波之差进行多电源配电网动态特征参数融合处理,提取多电源配电网动态参量特征值,根据线零模波速参数融合方法进行负载均衡调度,构建多电源配电网的空间负荷布局模型,进行传输时延和波阻抗等动态约束参数优化解析,实现多电源配电网动态规划优化。最后进行仿真测试分析,展示了本文方法在提高多电源配电网动态规划能力方面的优越性能。

1 多电源配电网的等效拓扑结构和参数分析

1.1 多电源配电网的等效拓扑结构

为了实现基于空间负荷布局的多电源配电网动态规划模型构建,首先需要结合多电源配电网的等效拓扑结构模型,通过多电源配电网动态规划参数融合,进行多电源配电网的参数控制和均衡控制,继而得到多电源配电网的等效拓扑电路结构图。

结合低负载时的回流功率参数分析方法,得到多电源配电网的电容电流参数为

$$z(t) = \int_1^n a(t)\theta(t)dt + \frac{x_i}{x_j} \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 为多电源配电网动态规划分析数据点 x_i 和 x_j 之间的相异度; $\theta(t)$ 为增大开关管的导通损耗参数; t 为自变量,取值范围 $[1, n]$ 。

在单位电压增益调节下,得到多电源配电网动态规划结构参数的融合度为

$$\Psi(d_1(t), d_2(t)) = \frac{1}{2} + \sqrt{\Psi - [z(t) + 1]^2} \quad (2)$$

式中: $d_1(t)$, $d_2(t)$ 分别为原适应度与电压调解后

的新适应度; Ψ 为多电源配电网参数。

在不同输出功率下,通过开关周期调节,得到多电源配电网的输出电压扰动分量 V_i ,当 $\Psi(d_1(t),d_2(t)) < 0$,输入电压 V 的稳定性参数分布特征量为

$$V(t) = \Psi(d_1(t),d_2(t)) + \sum_{i=1}^n V_i [z(t) + a(t)]^2 \quad (3)$$

根据量化电压增益调节和输出功率参数的均衡控制^[6],结合参数融合度及参数分布特征量,可以得到多电源配电网动态规划参数融合模型为

$$F = C + \int_1^n [V(t) + \frac{\Psi(d_1(t),d_2(t))}{2}] dt - 1 \quad (4)$$

式中: F 为多电源配电网动态规划参数融合模型; C 为均衡控制模型。

综上分析,结合多电源配电网输出侧回流功率增益控制的方法,进行多电源配电网动态规划和输出稳定性调节,建立多电源配电网的谐振电感参数融合控制模型,其表达式为

$$x(n) = \sqrt{a_i x + b_i x} - \frac{(n_i - k)(n_i - r)^2}{2} \quad (5)$$

式中: $x(n)$ 为谐振电感参数融合控制模型; x 为谐振电感参数; a_i 为总电感值; b_i 为互感值; n_i 为实际运行频率; k 为线圈回路之间的耦合程度; r 为耦合系数。

在此工作模式下,结合多电源配电网动态承受电压 V_i ,通过模糊增强技术^[7],得到多电源配电网的控制输出 $H(z)$ 为

$$H(z) = V_i + \sqrt{b_r(V_i + 1) - a_k(V_i - 1)} \quad (6)$$

式中: a_k 为多电源配电网动态规划结构化参数; b_r 为局部收敛权重。

根据上述多电源配电网的等效拓扑结构模型,进行动态规划设计^[8]。通过等效电路分布结构,建立多电源配电网负载均衡控制模型^[9],其表达式为

$$C = \sum_{i=1}^n (L_{ls} + L_{lp})^2 - c_n \quad (7)$$

式中: l 为多电源配电网负载数量; L_{ls} 为支路负荷节点负载; L_{lp} 为等效电路负荷节点负载; c_n 为配电网节点负载。

综上所述分析,得到多电源配电网的等效拓

扑电路结构如图1所示。

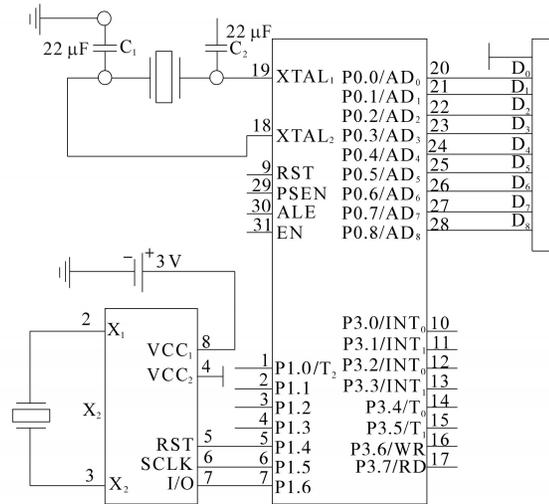


图1 多电源配电网的等效拓扑电路结构
Fig.1 Equivalent topological circuit structure of multi-power distribution network

1.2 动态规划约束参数分析

结合集中参数线路模拟方法进行多电源配电网动态规划过程中的约束参数分析,通过上述分析得到多电源配电网动态规划的负载均衡控制模型^[10],得到不同工作模式下配电网动态规划的等效约束参数为

$$S = \sin\alpha + \sqrt{L_{ls}^2 - L_{lp}} + [F - x(n)]^2 \quad (8)$$

式中: $\sin\alpha$ 为正弦函数。

在电流自然换流下,获取多电源配电网动态规划的谐振回路模型,在等效约束参数控制下得到输出电压增益如图2所示。

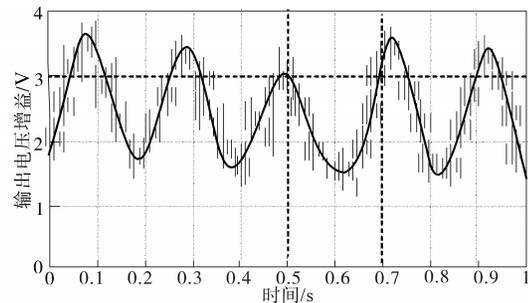


图2 输出电压增益
Fig.2 Output voltage gain

假设多电源配电网的稳态电压增益为 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$,调节谐振电流,得到多电源配电网的参数调度特征分布子空间为

$$\text{span} \{v_1, v_2, \dots, v_n\} = \sqrt{C + \frac{a_i + x_i}{a_i}} - \int_1^n [v_1(x) + v_n(x)] dx \quad (9)$$

式中: $v_1(x), v_n(x)$ 分别为第1个和第 n 个稳态电压增益。

式(9)也称作 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 的张成空间。

根据有功无功协调优化方法,得到多电源配电网动态规划的结构参数为

$$y_i = \sum_{i=1}^n W_i^H + X(a_i + x_i)^2 \quad (10)$$

式中: W_i^H 为多电源配电网结构参数; $X(\cdot)$ 为电感数据融合函数。

采用三移相控制方式,进行多电源配电网的空间负荷均衡调度^[11],得到动态规划约束参数分析模型为

$$X = (a_i + x_i)^2 + \frac{c_1}{a_2} \sum_{i=1}^n y_i - \sqrt{S} \quad (11)$$

式中: a_2, c_1 分别为多电源配电网动态规划结构参数和动态特征向量。

根据上述分析,建立动态规划约束参数分析模型,根据对多电源的配电网参数融合和负载均衡控制结果,进行动态规划和优化控制,提高负载均衡性^[12]。

2 多电源配电网动态规划优化

2.1 空间负荷均衡调度

对任意一个 $m \times n$ 维的多电源配电网动态规划结构参数,进行有功调度或无功调度,得到空间负荷布局传输矩阵 A ,提取多电源配电网动态参量特征值,根据线零模波速差参数融合方法进行负载均衡调度^[13],得到多电源配电网动态规划优化问题(最小化问题)可描述为

$$f(x) = \int_i [g_j(x) + h_j(x)] dx - \frac{1}{2} \quad (12)$$

式中: $g_j(x)$ 为互感值系数; $h_j(x)$ 为电感结构外径。

多电源配电网动态规划目标函数计算问题转化为一个全局优化问题 $\min\{f(x)\}$,根据配电系统安全稳定运行要求^[14],进行空间负荷均衡调度和自适应控制^[15],得到动态问题分布为

$$T_{em} = \pi(k_f + k_\beta)^2 - \sum_{x \neq 0} \min\{f(x)\} - f(x) \quad (13)$$

式中: k_f 为空间负荷调动参数; k_β 为自适应控制参数。

通过构建多电源配电网的空间负荷布局模型,进行传输时延和波阻抗等动态空间负荷均衡调度解析^[16],得到适应度权值为

$$w_k = w_{k-1} - \sqrt{p(z_k/x_k^i) + \frac{1}{2}q(x_k^i/x_{k-1}^i)} \quad (14)$$

式中: x_k^i, w_{k-1}^i 分别为第 k 个与 $k-1$ 个适应度系数; z_k 为动态空间负荷均衡调度系数; p, q 分别为传输时延与波阻抗。

由此构建多电源配电网动态规划空间负荷模型为

$$f_0(X) = \sum_{X=1} \varepsilon P_1(X) + f_u(\chi) \quad (15)$$

式中: $f_0(X)$ 为多电源配电网动态规划空间负荷模型; $P_1(X)$ 为负荷消纳参数; ε 为负荷消纳的阈值; $f_u(\chi)$ 为空间维度参数。

$f_u(\chi)$ 定义为

$$f_u(\chi) = \sqrt{e^{-\sigma\chi} - 1} + e^{-\sigma} \quad (16)$$

式中: σ 为一个较大的常数。

采取有功无功协调优化控制的方法,得到空间调度分布函数为

$$P_w = \sum_{r=1}^n (P_{air} + k_r)^2 - \frac{C_f}{2\pi} \quad (17)$$

式中: k_r 为第 r 个多电源配电网动态规划的有功损耗; P_{air} 为多电源配电网动态特征收敛参数; C_f 为配电系统安全稳定运行的空间负荷平衡节点。 C_f 可描述为

$$C_f = [(P_{air}/k_r)^{0.3} + P_w^{0.5}]^2 - 2P_w \quad (18)$$

基于无约束优化,结合空间负荷平衡节点,得到多电源配电网动态规划的空间负荷均衡可靠性调度模型,其表达为

$$M = (m \times n)^2 + \sqrt{\frac{1 - C_f}{\min\{f(x)\}}} \quad (19)$$

通过上述分析,对空间负荷均衡进行控制,继而进行多电源配电网动态规划的配电网可靠性调度,提高多电源配电网的输出稳定性。

2.2 配电网的动态规划优化输出

通过上述分析,构建多电源配电网的空间负荷均衡调度模型,进行传输时延和波阻抗等动态约束优化解析,实现多电源配电网动态规划优化输出。

采取有功无功协调控制,得到多电源配电网动态规划的线性调节函数,其表达为

$$x_j = \sum_{x \neq j} \max(x) - \min(x) + \frac{\rho}{2} \quad (20)$$

式中: ρ 为收缩因子。

假设以收缩因子 ρ 为多电源配电网动态规划

的动态约束参量,通过对多电源配电网的特征分布融合度进行自适应迭代,得到自适应迭代的收缩参数为

$$\rho(t) = \sum_{i=1}^n (x_j - 0.04t)^2 - 1 \quad (21)$$

考虑配电网的空间运维管理方法,得到全局空间规划的迭代步长为

$$T_{out} = (x_j + \rho)^2 - \sum_{i=1}^n \rho(t) + x_j(t) \quad (22)$$

通过传输时延动态约束优化解析,得到多电源配电网动态规划的确定性解模型,其可以描述为

$$Q = T_{out} - q(t) + \sqrt{X_n^m - 1} \quad (23)$$

其中 $X_n^m = r(D,1)$ 式中: X_n^m 为 D 个 $[-1, 1]$ 区间随机分布的特征量; $q(t)$ 为配电网传输试验动态约束参数。

通过波阻抗均衡调度结果,得到第 N_L 个本地调度节点的优化配置函数为

$$f_0(X) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w_p(X) + w_v(X) + w_c(X)}{P_1} dX \quad (24)$$

式中: w_p, w_v, w_c 为权重系数; P_1 为多电源配电网动态规划的可靠性特征量。

综上分析,得到配电网的动态规划优化输出函数为

$$S_y = f_0(X) - \sqrt{N_L + [g'_j(x) - h'_j(x)]^2} \quad (25)$$

式中: $g'_j(x)$ 为自适应加权指数向量; $h'_j(x)$ 为波阻抗指数向量。

通过上述分析,优化配电网动态规划,从而实现多电源配电网动态规划设计,确保了多电源配电网的输出稳定性,提高了规划效率和规划质量。

3 仿真测试分析

仿真实验中,多电源配电网的分布节点数为120,最大承受电流为240 A,多电源配电网输出功率 $P_0=500$ kW,感性阻抗为 12Ω ,分布式电源开关频率为1.45 kHz,最优输出功率为 $P_a=0.25$ kW,最大迭代次数 $iter_{max} = 1000$ 。

分布式电源配电网的最优约束条件的参量设定如下:

$$\min f(\vec{x}) = 1.1047x_1^2x_2 + 0.04811x_3x_4(14.0 + x_2)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g_1(\vec{x}) = \tau(\vec{x}) - \tau_{\max} \leq 0 \\ g_2(\vec{x}) = \sigma(\vec{x}) - \sigma_{\max} \leq 0 \\ g_3(\vec{x}) = x_1 - x_4 \leq 0 \\ g_4(\vec{x}) = 0.10471x_1^2 + 0.04811x_3x_4(14.0 + x_2) - 5 \leq 0 \\ g_5(\vec{x}) = 0.125 - x_1 \leq 0 \\ g_6(\vec{x}) = \delta(\vec{x}) - \delta_{\max} \leq 0 \\ g_7(\vec{x}) = P - P_c(\vec{x}) \leq 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中: \vec{x} 为多电源配电网节点; $\tau(\vec{x})$ 为分布式电源开关频率参数; τ_{\max} 为分布式电源开关频率最小值; $\sigma(\vec{x})$ 为 \vec{x} 的方差; σ_{\max} 为 \vec{x} 的方差最小值; $\delta(\vec{x})$ 为输出功率参数; δ_{\max} 为输出功率最大值; P 为最大承受电流; $P_c(\vec{x})$ 为电流参数; x_1, x_2, x_3, x_4 为不同参数调节系数。

接入 DG 的 IEEE33 节点系统的节点和支路标号均已在图3中标出,其中支路开关8-21,9-15,12-22,18-33,25-29为联络开关,初始状态下均处于断开状态。系统中接入4个分布式电源(distributed generation, DG), DG接入位置选择重要的、等级高的负荷节点和系统末端。

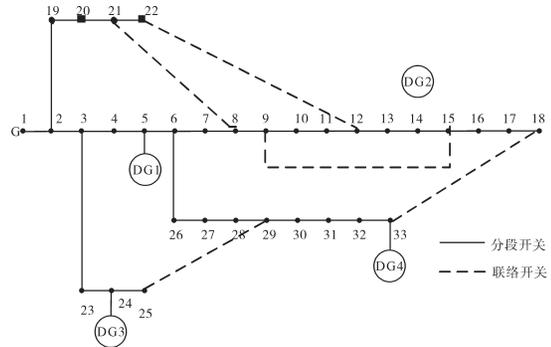


图3 接入DG的IEEE33节点系统

Fig.3 IEEE33 node system accessing DG

根据上述仿真参量设定,进行多电源配电网的动态规划设计,将本文方法、以解决现状电网问题为导向的文献[2]方法、计及模糊随机性的文献[3]方法和实测值做对比分析,得到的多电源配电网输出功率、电流、电压等参数的跟踪曲线如图4所示。分析图4得知,图4a中本文方法的配电网输出功率相对稳定;图4b中本文方法能够有效跟踪输出电流;图4c中本文方法能够有效跟踪输出电压,由此可见本文方法进行多电源配电网的动态规划,输出参数的稳态跟踪性能较好。主要是由于本文方法通过多电源配电网的等效拓扑电路结构,建立了动态规划约束参数分析模型,根据对

多电源的配电网参数融合和负载均衡控制结果,进行动态规划和优化控制,提高负载均衡性,使得输出参数的稳态跟踪性能较好。

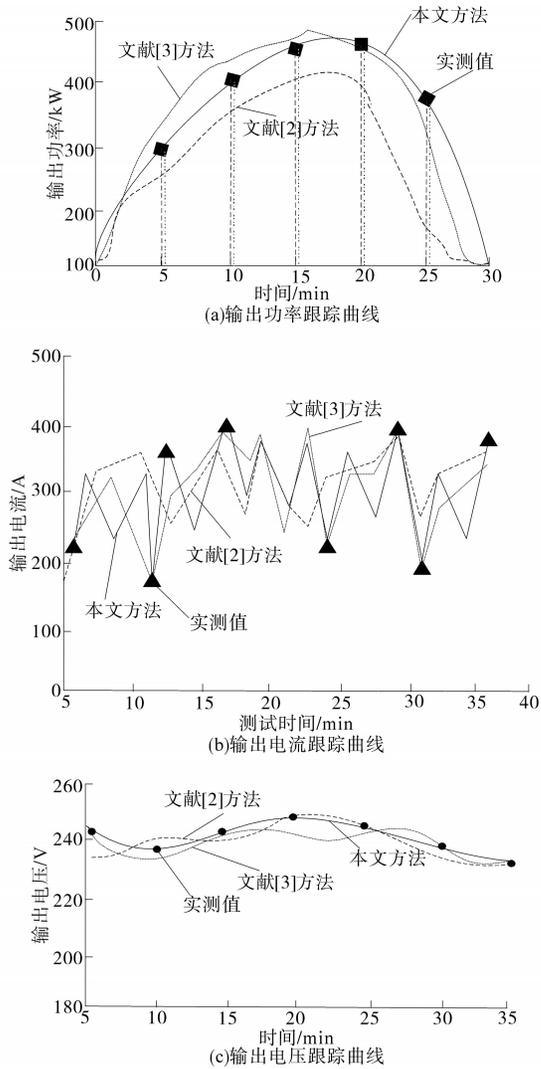


图4 输出性能测试

Fig.4 Output performance test

基于上述输出性能测试,采用本文方法与文献[2]和文献[3]方法分别测试配电网的动态规划输出偏差,得到的结果如图5所示。

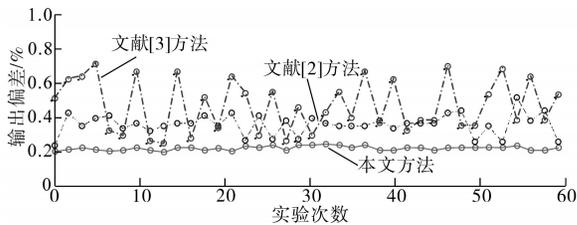


图5 输出偏差

Fig.5 Output deviation

分析图5得知,本文方法相较于文献[2]和文献[3]方法进行多电源配电网动态规划,其输出偏差较低,且相对稳定,能够有效提高多电源配

网动态规划能力和输出稳定性。

为了进一步验证本文方法的优越性能,需要对规划用时、规划成本和规划质量进行分析。对比不同方法下的电源规划和网架规划所用时间,结果如表1所示。

表1 电源规划和网架规划所用时间比较

Tab.1 Time comparison of power supply planning and grid structure planning

实验次数	文献[2]模型时间/s		文献[3]模型时间/s		本文模型时间/s	
	电源	网架	电源	网架	电源	网架
10	5.6	6.8	2.3	9.6	1.2	1.0
20	5.8	7.2	2.9	10.2	1.5	1.1
30	5.4	7.6	3.6	9.8	1.3	1.0
40	5.7	8.8	4.1	8.6	1.1	1.2
50	5.2	9.3	3.7	7.4	1.2	1.3
60	5.4	9.4	3.9	7.9	1.3	1.5
70	5.5	12.3	4.3	8.3	1.2	1.4
80	5.4	11.5	4.7	8.5	1.2	1.3
90	5.3	15.5	5.8	11.7	1.4	1.2

由表1可知,本文方法与文献[2]方法和文献[3]方法相比,本文方法的电源规划和网架规划所用时间均较短,主要是由于本文方法构建了多电源配电网的空间负荷均衡调度模型,进行传输时延和波阻抗等动态约束优化解析,使得本文方法的电源规划和网架规划效率更高。

规划成本分为时间成本和经济成本两个方面,也就是多电源配电网规划方案生成的时间以及需要投入的金额。而规划质量主要是从线损和供电可靠性两个方面进行分析。其中供电可靠性的评价标准如表2所示。

表2 多电源配电网规划可靠性评价标准

Tab.2 Reliability evaluation criteria for multi source distribution network planning

可靠性等级	电压合格率/%	供电可靠性说明
I级	≥99.99	户均年停电时间不高于5 min
II级	≥99.98	户均年停电时间不高于52 min
III级	≥99.95	户均年停电时间不高于3 h
IV级	≥99.70	户均年停电时间不高于9 h
V级	≥99.30	户均年停电时间不高于15 h

另外多电源配电网规划结果的线损率可以通过线路损失负荷与供电负荷的比值计算得出,经过对规划结果中相关数据的调取,可以分别得出规划成本和规划质量的对比结果,如表

3所示。

表3 规划成本和规划质量对比结果

Tab.3 Comparison results of planning cost and planning quality

指标	规划成本		规划质量	
	经济成本/ 万元	时间成本/ min	线损率/ %	供电可靠性 等级
文献[3]方法	12.31	34.2	6.8	Ⅳ级
文献[4]方法	8.55	25.8	5.7	Ⅱ级
本文方法	6.27	11.4	2.3	Ⅰ级

由表3的结果可知,考虑空间负荷布局的多电源配电网动态规划优化的本文方法,相比于文献[2]方法和文献[3]方法的单位经济成本和时间成本更低,线损率更低,供电可靠性等级最高。主要是因为本文方法有效优化了配电网动态规划、实现了多电源配电网动态规划设计,从而在保证规划质量的同时降低了规划成本、提高了规划质量,实际应用效果更好。

4 结论

研究多电源配电网的动态规划优化方法,通过负载均衡调度,进行多电源配电网的优化线路传输和节点分布式控制,从而提高多电源配电网的动态规划和控制能力。

本文提出考虑空间负荷布局的多电源配电网动态规划优化方法。通过进行多电源配电网动态规划的约束参数分析,结合等效电路分布结构,进行多电源配电网的参数控制和均衡控制,结合集中参数线路模拟方法进行多电源配电网动态规划过程中的约束参量分析,采用三移相控制方式,进行多电源配电网的空间负荷均衡调度,结合配电网的运维管理方法,进行空间负荷均衡调度和自适应控制。通过对多电源配电网的特征分布融合度进行自适应迭代,实现多电源配电网动态规划优化设计,提高了多电源配电网的输出稳定性。

分析得知,本文方法进行多电源配电网动态规划的稳态跟踪能力较好、输出偏差较小、规划用时更短、规划成本更低、规划质量更高、应用效果更好。

参考文献

[1] 李阳,刘友波,黄媛,等.配电网中长期动态规划投资的标尺激励评价方法[J].电力自动化设备,2018,38(6):95-102.
Li Yang, Liu Youbo, Huang Yuan, *et al.* Scale incentive evaluation method for medium and long-term dynamic planning in-

vestment in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 95-102.

[2] 高崇,赵懿祺,唐俊熙,等.以解决现状电网问题为导向的配电网自动规划方法研究[J].电力系统保护与控制,2018(1):85-92.
Gao Chong, Zhao Yiqi, Tang Junxi, *et al.* Research on automatic distribution network planning methods oriented to solve current grid problems[J]. Power System Protection and Control, 2018(1):85-92.

[3] 张坤,党东升,马艳霞,等.主动式配电网电源分区布点规划关键技术研究[J].电网与清洁能源,2020,36(3):42-48.
Zhang Kun, Dang Dongsheng, Ma Yanxia, *et al.* Research on key technologies of power distribution planning in active distribution Network [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3):42-48.

[4] 臧海祥,傅雨婷,陈铭,等.基于改进自适应遗传算法的EV充电站动态规划[J].电力自动化设备,2020,40(1):163-170.
Zang Haixiang, Fu Yuting, Chen Ming, *et al.* Dynamic planning of EV charging station based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1):163-170.

[5] 倪识远,张林垚,胡志坚.考虑电源和负荷时序特性的主动配电网网源协调规划方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):12-21.
Ni Zhiyuan, Zhang Linyao, Hu Zhijian. Coordinated planning method for active distribution network sources considering power and load timing characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10):12-21.

[6] 周群,游志昆,刘雪山,等.I2控制 Buck 变换器稳定性的研究[J].电源学报,2019,17(2):40-49.
Zhou Qun, You Zhikun, Liu Xueshan, *et al.* Research on the stability of Buck converter controlled by I2[J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(2): 40-49.

[7] 谭笑,王主丁,李强,等.计及多约束的多分布式电源接入配电网最大承载力分段算法[J].电力系统自动化,2020,44(4):72-80.
Tan Xiao, Wang Zhuding, Li Qiang, *et al.* Segmentation algorithm of maximum carrying capacity of multi-distributed generation connected to distribution network with multiple constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4):72-80.

[8] 潘霄,沈方,张明理,等.基于需求相关性分组预测的主动配电网分布式电源规划方法[J].可再生能源,2019,37(4):582-587.
Pan Xiao, Shen Fang, Zhang Mingli, *et al.* Active distribution network distributed power planning method based on demand correlation grouping forecasting[J]. Renewable Energy, 2019,

- 37(4): 582-587.
- [9] 陈翰澍,周焕林,邱新刚,等. 构架空间多支管节点试验研究与力学分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 237-242.
Chen Hanshu, Zhou Huanlin, Qiu Xingang, *et al.* Experimental study and mechanical analysis of multi-branch joints in frame space[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(2): 237-242.
- [10] 何芹帆,陈红坤. 考虑供需互动的含分布式电源配电网架规划[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(1): 7-12.
He Qinfan, Chen Hongkun. Planning of distribution network with distributed power considering the interaction of supply and demand[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(1): 7-12.
- [11] 迟福建,李桂鑫,孙阔. 配电网信息物理系统恶性数据链检测与识别[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(1): 174-178.
Chi Fujian, Li Guixin, Sun Kuo. Detection and identification of malicious data link in cyber-physical systems of distribution network[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(1): 174-178.
- [12] 郑洁云,胡梦月,胡志坚,等. 考虑可靠性及需求响应的配电网规划模型[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 3-12.
Zheng Jieyun, Hu Mengyue, Hu Zhijian, *et al.* Distribution network planning model considering reliability and demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 3-12.
- [13] 孙志媛,梁水莹,傅裕斌. 基于PSNodeRank算法的电力系统关键节点辨识方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 157-162.
Sun Zhiyuan, Liang Shuiying, Fu Yubin. Power system key node identification method based on PSNodeRank algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 157-162.
- [14] 任智君,郭敏铎,郭红霞,等. 电源-用户互动模式下的主动配电网分布式电源规划[J]. 可再生能源, 2019, 37(11): 1643-1649.
Ren Zhijun, Guo Minhua, Guo Hongxia, *et al.* Distributed generation planning of active distribution network under the mode of power-user interaction[J]. Renewable Energy, 2019, 37(11): 1643-1649.
- [15] 张晋博,丁传红. 基于神经网络的模数转换电路动态误差源识别系统设计[J]. 现代电子技术, 2019, 42(21): 53-57.
Zhang Jinbo, Ding Chuanhong. Design of dynamic error source identification system for analog-to-digital conversion circuit based on neural network[J]. Modern Electronic Technology, 2019, 42(21): 53-57.
- [16] 刘明,赵作男,谢国民. 一种应用于分布式电源的高增益双输入DC-DC变换器[J]. 电气传动, 2020, 50(9): 53-59.
Liu Ming, Zhao Zuonan, Xie Guomin. A high-gain dual-input DC-DC converter applied to distributed generation[J]. Electric Drive, 2020, 50(9): 53-59.

收稿日期:2021-01-17

修改稿日期:2021-02-11