

DOI: 10.7667/PSPC170977

考虑运行方式优化和拓扑校正控制的参考电网优化方法

孙东磊¹, 李雪亮¹, 韩学山², 李山², 杨思¹, 杨金洪³

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250021; 2. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061; 3. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250021)

摘要: 针对现有参考电网模型未涉及电网现状以及未关联电网运行策略的不足, 提出了考虑运行方式优化和拓扑校正控制的参考电网优化方法, 为输电网灵活规划提供重要参考。基于前瞻时间尺度内各时段负荷预测值和规划网络候选支路方案, 构建以最小化发电成本和输电成本之和为目标, 以系统正常运行状态以及 $N-1$ 事故状态下的运行安全要求为约束条件的参考电网优化模型。对优化模型中混合整数非线性约束式进行处理, 将其转换为混合整数二次规划模型, 并采用混合整数二次规划法对优化模型进行求解, 得到最终的优化方案。最后, 通过算例分析说明了所提方法的有效性。

关键词: 参考电网; 电网评估; 运行方式优化; 拓扑校正控制; 灵活规划

Optimization method for reference network considering operation mode optimization and topology correction control

SUN Donglei¹, LI Xueliang¹, HAN Xueshan², LI Shan², YANG Si¹, YANG Jinhong³

(1. Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, China; 2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company, Jinan 250021, China)

Abstract: Considering the shortage of the existing reference network models rarely taking the performance of realistic power grid and its operation modes into consideration, an optimization method for reference network considering operation mode optimization and topology correction control is proposed to provide guidance for transmission flexible planning. Based on the forecasted load level in the schedule time scale and candidate branches in network planning strategy, a novel model for reference network is built to minimize the total generation cost and transmission cost, in which the security constraints such as transmission line constraints under normal and $N-1$ contingency conditions should be respected. The proposed model is a complex mixed-integer nonlinear problem mathematically, and can be converted to a mixed-integer quadratic programming problem, which is solved by the mature mixed-integer quadratic programming method to attain the optimization scheme. Finally, case studies are conducted to illustrate the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477091) and National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205).

Key words: reference network; power grid evaluation; operation mode optimization; topology correction control; flexible planning

0 引言

电网在发电与负荷平衡过程中起着重要的支撑作用。该平衡的能力和裕度与电网特性有关。随着

资源和环境问题日趋突出, 终端用户的电能替代以及发电侧清洁替代的趋势日渐高涨^[1], 电网中源荷时空分布日趋不均衡, 电网发展也将不均衡, 电网对源荷平衡的支撑作用面临挑战。如何对其进行评价和量化以指导电网运行与规划具有重要的现实需求性^[2]。

参考电网^[3]提供了一套能够从经济角度对现有

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477091); 国家重点基础研究发展计划项目资助(973计划)(2013CB228205)

网络进行客观评估的标准。通过对参考电网的最优投资成本和最优阻塞成本进行量化, 可将其与现有电网的投资和阻塞成本进行比较。通过比较参考电网单条线路的容量和现有电网的单条线路容量, 可以明确输电系统所需要的新投资。参考电网的概念最初由 Boiteux 于 1949 年从经济角度提出, 用于确定边际成本和最优输电价格等^[4], 此后发展出不同的数学模型。文献[5]提出一种覆盖各电压等级配电网的参考电网理论模型, 其在满足各种电网运行技术要求的前提下追求电网投资成本最小。文献[6]基于现状电网拓扑结构提出了以追求电网投资成本和运行成本最小的参考电网理论模型以实现市场环境下输电容量最优决策。市场环境下输电网络的传输能力直接决定了不同地域分布的发电机组参与市场竞争的水平, 为此, 文献[7]从经济角度出发提出了一种基于博弈理论的参考电网模型, 以实现输电网络扩容的经济价值的评价。文献[8]计及智能配电网的电网运行方式调整, 提出一种智能参考电网模型实现了电网运行方式和定价的快速决策。文献[9]提出一种多目标参考电网性能评估模型以实现输电网络升级改造的投资费用进行评估。文献[10]基于参考电网概念实现了对配电网不同投资策略的经济性、可靠性评价。为了提高参考电网评价在大规模系统的实用性, 文献[11]提出参考电网奔德斯分解与协调的优化方法, 将参考电网模型分解为正常运行状态下的主问题和预想事故状态下的子问题交替迭代求解。

电网发展的目的在于满足实际运行需求, 电网规划评估的效果很大程度上依赖于对电网运行特征的关注程度^[12]。在上述的参考电网模型中, 网络的拓扑结构已知且在未来规划时段内固定不变。但在电网实际运行中, 由于在一定的运行时间范围内负荷水平实时变化, 与此同时风电、光伏等可再生能源发电的大规模并网使得电源侧也存在时变性, 为此源荷平衡方式需实时调整^[13], 输电系统的拓扑结构也随之改变, 输电线路可能会由于运行方式的变化退出运行。固定的电网结构不利于源-网-荷之间的协调^[14]。电网中若释放部分线路有可能会提高系统的输送能力, 实现更为经济的源荷平衡方式, 此现象即为电网经济运行中的非同调现象, 即一个输配电元件从系统中缺省反而产生一个更经济的系统状态^[15]。文献[16]指出输电网络扩容模型中考虑网络拓扑调整可以降低电网规划成本和改善输电网络扩容结果。文献[17]指出在含大规模风电并网的输电网络规划问题中, 考虑网络结构优化可以在促进风电消纳的同时更大程度地利用现状电网并节省电网投

资。此外, 现有的参考电网模型尚未涉及电网情况, 直接将其用于电网规划投资决策欠妥。对此, 需要在考虑现状电网情况下, 基于电力需求预测, 预演电网发展规律, 前瞻性地把握电网运行情况, 超前预判电网在未来时间窗内负荷水平下的适应性, 为诊断电网薄弱环节和实现电网灵活规划决策提供参考。

由此, 本文基于前瞻时间尺度内各时段负荷预测值以及规划网络候选支路方案, 构建以最小化前瞻周期内发电成本和输电成本之和为目标, 以系统正常运行状态以及 $N-1$ 事故运行状态下的运行安全技术要求为约束条件的优化模型, 对优化模型中混合整数非线性约束式进行处理, 将其转换为混合整数二次规划模型, 并采用混合整数二次规划法对优化模型进行求解。最后, 以 3 节点系统和某实际电力系统为例说明了所提方法的有效性和经济效益。

1 考虑运行方式优化和拓扑校正控制的参考电网模型

考虑运行方式优化和拓扑校正控制的参考电网模型是在直流潮流的条件下以追求前瞻周期内发电成本和输电成本之和最小为目标, 同时满足系统正常运行状态以及 $N-1$ 事故运行状态下的运行安全技术约束条件, 以对输电支路安全容量和系统运行方式(发电-负荷平衡方式、电网拓扑结构)进行联合决策。为便于表述, 本文中统一以上标“max”和“min”分别表示相应变量的上、下限。

1.1 目标函数

参考电网目标函数为

$$\min \left(\sum_{t \in N_T} \tau_t \sum_{g \in N_G} C_g (P_g^t) + \sum_{l \in N_L} C_l L_l (T_l - T_l^{\min}) \right) \quad (1)$$

式中: N_T 为划分的负荷时段集合; N_G 为发电机集合; N_L 为输电支路集合; P_g^t 为常规机组 g 在时段 t 输出有功功率; $C_g (P_g^t)$ 为常规机组 g 的发电成本特性函数, 取二次表达式为 $C_g (P_g^t) = a_g (P_g^t)^2 + b_g P_g^t + c_g$, 其中 a_g 、 b_g 和 c_g 为成本系数; τ_t 为负荷时段 t 的持续时间; C_l 为线路 l 的年投资成本; L_l 为线路 l 的长度; T_l 为线路 l 的传输容量; T_l^{\min} 为设定的支路容量下限, 取值为现状电网支路容量。

1.2 约束条件

约束条件如下所述。

1) 节点功率平衡约束

$$\sum_{l \in N_{S,i}} P_{l,ij}^t - \sum_{l \in N_{E,i}} P_{l,ji}^t = \sum_{g \in N_{G,i}} P_g^t - \sum_{d \in N_{D,i}} P_d^t \quad (2)$$

$$\forall i \in N_B, \forall t \in N_T$$

式中: $P'_{l,ij}$ 为负荷时段 t 支路 l 的传输有功功率, 其首、末节点分别为节点 i 和节点 j ; $N_{S,i}$ 和 $N_{E,i}$ 分别为以节点 i 为首、末端节点的输电支路集合; $N_{G,i}$ 和 $N_{D,i}$ 分别表示节点 i 上的发电机集合和负荷集合; P'_d 为时段 t 时的负荷 d 有功功率。

2) 发电机组有功功率上下限约束

$$P_g^{\min} \leq P'_g \leq P_g^{\max}, \forall g \in N_G, \forall t \in N_T \quad (3)$$

式中: P_g^{\max} 和 P_g^{\min} 分别为发电机组 g 的有功功率上、下限。

3) 输电支路传输容量约束

$$P'_{l,ij} = z'_i B_l (\theta'_i - \theta'_j), \forall l \in N_L, t \in N_T \quad (4)$$

$$-z'_i T_l \leq P'_{l,ij} \leq z'_i T_l, \forall l \in N_L, \forall t \in N_T \quad (5)$$

式中: N_L 为输电支路集合; B_l 为输电支路 l 电纳; θ'_i 为负荷时段 t 节点 i 电压相角; z'_i 为负荷时段 t 支路 l 的运行状态, 其为 0-1 变量, $z'_i=1$ 表示负荷时段 t 支路 l 处于运行状态, $z'_i=0$ 表示负荷时段 t 支路 l 处于停运状态。

4) 电容量范围约束

$$T_l^{\min} \leq T_l \leq T_l^{\max}, \forall l \in N_L \quad (6)$$

式中, T_l^{\max} 为设定的支路容量上限。

5) $N-1$ 预想事故情况下节点功率平衡约束

$$\sum_{l \in N_{S,i}} P'_{l,ij} - \sum_{l \in N_{E,i}} P'_{l,ji} = \sum_{g \in N_{G,i}} P'_g - \sum_{d \in N_{D,i}} P'_d \quad (7)$$

$$\forall i \in N_B, \forall t \in N_T, \forall k \in N_k$$

式中: N_S 为预想事件集合; (k) 为标记事故运行状态 k , 下同。

6) $N-1$ 预想事故情况下发电机组有功功率上、下限约束

$$P_g^{\min} \leq P'_g \leq P_g^{\max}, \forall g \in N_G \quad (8)$$

7) 支路开断数量约束

$$P'_{l,ij} = z'_i B_l (\theta_i^{(k)} - \theta_j^{(k)}), \forall l \in N_L, \forall t \in N_T, \forall k \in N_k \quad (9)$$

$$-z'_i T_l \leq P'_{l,ij} \leq z'_i T_l, \forall l \in N_L, \forall t \in N_T, \forall k \in N_k \quad (10)$$

8) 参考节点电压相角约束

$$\theta_n = 0, \forall t \in N_T \quad (11)$$

$$\theta_i^{(k)} = 0, \forall t \in N_T, \forall k \in N_k \quad (12)$$

式中, n 为电压参考节点的节点号。

2 模型求解方法

式(1)一式(12)构成了本文考虑运行方式优化和

安全校正的参考电网评价模型, 其在数学上为混合整数非线性优化模型, 具有较大的求解复杂度。对此, 本文通过引入辅助变量将其转化为混合整数规划模型, 并由成熟的混合整数二次规划方法求解, 具体如下所述。

对于式(4)含有整数变量和连续变量乘积形式的等式约束, 通过引入一个非常大的常数将其转换为混合整数线性约束形式, 即

$$\begin{cases} P'_{l,ij} - B_l (\theta'_i - \theta'_j) + (1 - z'_i) M \geq 0, \forall l \in N_L, t \in N_T \\ P'_{l,ij} - B_l (\theta'_i - \theta'_j) - (1 - z'_i) M \leq 0, \forall l \in N_L, t \in N_T \end{cases} \quad (13)$$

式中, M 为一个非常大的数, $M \gg B_l \theta_{ij}^{\max}$, θ_{ij}^{\max} 表示支路两端电压相角差的最大值, $\theta_{ij}^{\max} \leq \pi/2$ 。由于 M 非常大, 则当 $z'_i=1$ 时, 自动满足 $P'_{l,ij} - B_l (\theta'_i - \theta'_j) = 0$, 而当 $z'_i=0$ 时, 支路功率跟其两端节点电压相角之间不构成约束关系。类似地, 将式(9)转换为

$$\begin{cases} P_{l,ij}^{(k)} - B_l (\theta_i^{(k)} - \theta_j^{(k)}) + (1 - z'_i) M \geq 0 \\ P_{l,ij}^{(k)} - B_l (\theta_i^{(k)} - \theta_j^{(k)}) - (1 - z'_i) M \leq 0 \\ \forall l \in N_L, \forall t \in N_T, \forall k \in N_k \end{cases} \quad (14)$$

对于式(5)含有整数变量和连续变量乘积形式的不等式约束, 通过引入辅助变量将其转换为混合整数非线性约束形式, 即

$$\begin{cases} -Q'_l \leq P'_{l,ij} \leq Q'_l \\ z'_i T_l^{\min} \leq Q'_{l,ij} \leq z'_i T_l^{\max} \\ (1 - z'_i) T_l^{\min} \leq R'_{l,ij} \leq (1 - z'_i) T_l^{\max} \\ Q'_l = T_l - R'_l \end{cases}, \forall l \in N_L, t \in N_T \quad (15)$$

式中: 辅助变量 Q'_l 和 R'_l 均为连续变量。由此, 当则当 $z'_i=1$ 时, $R'_l=0$, $Q'_l=P_l^{\max}$, 自动满足 $-T_l \leq P'_{l,ij} \leq T_l$, 而当 $z'_i=0$ 时, $Q'_l=0$, 将迫使 $P_l^{\max}=0$, 因此其与式(5)等价。类似地, 将式(10)转换为

$$\begin{cases} -Q_l^{(k)} \leq P_{l,ij}^{(k)} \leq Q_l^{(k)} \\ z_i^{(k)} T_l^{\min} \leq Q_{l,ij}^{(k)} \leq z_i^{(k)} T_l^{\max} \\ (1 - z_i^{(k)}) T_l^{\min} \leq R_{l,ij}^{(k)} \leq (1 - z_i^{(k)}) T_l^{\max} \\ Q_l^{(k)} = T_l - R_l^{(k)} \\ \forall l \in N_L, \forall t \in N_T, \forall k \in N_k \end{cases} \quad (16)$$

3 算例分析

算例仿真在一台配置为 3.10 GHz 主频、4 G 内

存的计算机上进行, 在 Microsoft visual studio 2008 环境下, 采用 C++ 语言编制本文考虑运行方式优化和拓扑校正控制的参考电网优化程序, 其中混合整数二次规划模型求解调用 CPLEX 优化器进行求解。

3.1 3 节点系统算例分析

1) 3 节点系统算例

以图 1 所示的简单 3 节点系统为例说明所提方法的有效性, 将所提方法与电网结构固定不变下的方法作为对比。3 节点系统输电元件数据、发电机组特性数据以及负荷数据详见表 1—表 3。

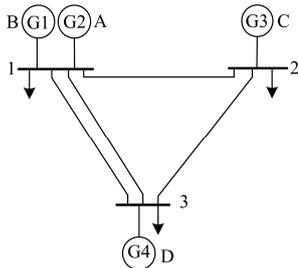


图 1 3 节点电力系统

Fig. 1 A 3-bus power system

表 1 3 节点系统输电元件数据

Table 1 Branch parameters for the 3-bus system

输电元件	电抗/p.u.	输电容量/MW	边际成本(\$/MW)
1-2	0.2	126	10
1-3	0.4	125	10
1-3	0.4	125	10
2-3	0.1	130	10

表 2 3 节点系统发电机组特性数据

Table 2 Units parameters for the 3-bus system

发电机	容量/MW	边际成本(\$/MW·h)
G1	140	7.5
G2	285	6
G3	90	14
G4	85	10

表 3 3 节点系统负荷数据

Table 3 Load data for the 3-bus system

节点	T ₁ 功率/MW	T ₂ 功率/MW	T ₃ 功率/MW
1	47.5	50	52.5
2	57	60	63
3	285	300	315

2) 对比分析

采用所提的考虑 N-1 安全约束条件的参考电网优化方法和仅考虑正常运行状态下的方法决策的目标值分别为 8 677.50 \$、8 317.50 \$, 各输电元件正常输送容量和安全容量如表 4 所示。

由表 4 对比可以看出: 考虑到 N-1 安全性因素

时要比仅考虑正常运行状态时决策的成本要高, 而且两者决策的输电容量最优值不同, 考虑到 N-1 安全性因素时是将输电元件 1-2 扩容, 而仅考虑正常运行状态时决策的结果是当前的电网条件就能满足前瞻时间窗内负荷增长需求。由此可见, 不同的安全性约束条件对应着不同的规划运行经济性水平, 实际上电网规划的难点就在于对电网运行安全性与经济性之间的权衡。

表 4 正常运行状态以及 N-1 安全约束下输电元件容量

Table 4 Transmission capacity decided by the optimization model

for normal operation mode and N-1 contingency state

输电元件	初始容量/MW	正常输送容量/MW	安全容量/MW
1-2	126	126.0	126.0
1-3	125	125.0	125.0
1-3	125	125.0	125.0
2-3	130	130.0	133.6

采用所提运行方式优化与拓扑校正控制的参考电网优化方法和电网结构固定不变下的参考电网优化方法决策的目标值分别为 8 677.50 \$、8 786.25 \$, 各输电元件安全容量如表 5 所示。

表 5 3 节点电力系统输电元件安全容量

Table 5 Security capacity of transmission lines

for the 3-bus system

输电元件	初始容量/MW	安全容量/MW	
		考虑运行方式优化	电网结构固定不变
1-2	126	126.0	135.0
1-3	125	125.0	125.0
1-3	125	125.0	125.0
2-3	130	133.6	130.0

由表 5 对比可以看出: 考虑运行方式优化与拓扑校正控制时要比电网结构固定不变时决策的成本要低, 而且两者决策的输电容量最优值不同, 考虑运行方式优化与拓扑校正控制时希望将输电元件 2-3 扩容, 而仅考虑电网结构固定不变时决策的结果是希望输电元件 1-2 扩容, 这是因为前者计及运行方式优化与拓扑校正控制情况, 扩大了优化决策解的空间, 从而在系统运行时某种负荷水平下解除受电网 KVL 约束制约的输电能力, 在本例中对应为正常负荷模式下停运支路 2-3, 改善了参考电网优化决策效果。同时也说明了传统的电网结构固定不变下的参考电网优化方法具有一定的保守性。

采用所提的参考电网优化方法在考虑和不考虑现状电网时决策的输电元件安全容量如表 6 所示。

由表 6 对比可以看出: 采用不考虑现状电网时的参考电网优化方法决策, 其部分输电元件安全容量低于其初始容量, 如支路 1-3、支路 2-3 等, 这种

对实际存量电网重新进行容量优化决策无实际意义,具有一定的局限性。为此,需要对存量电网进行运行方式优化,对增量电网(扩容部分或候选输电走廊部分)进行容量优化,从而明确现状电网薄弱环节,指引电网规划方向。

表 6 考虑和不考虑现状电网时输电元件安全容量

Table 6 Security capacity of transmission lines considering and not considering existing grid

输电元件	初始容量/ MW	安全容量/MW	
		考虑现状电网	不考虑现状电网
1-2	126	126.0	156.0
1-3	125	125.0	115.0
1-3	125	125.0	115.0
2-3	130	133.6	121.6

3.2 实际系统算例分析

进一步分析如图 2 所示的某实际系统。该系统由 21 个母线、5 台常规发电机组、4 个并网风电场、21 个负荷以及 38 条输电支路组成,输电支路参数详见表 7。将所提方法与电网结构固定不变下的方法作为对比。采用所提运行方式优化与拓扑校正控制的参考电网优化方法和电网结构固定不变下的参考电网优化方法决策的各输电元件安全容量如表 8 所示。

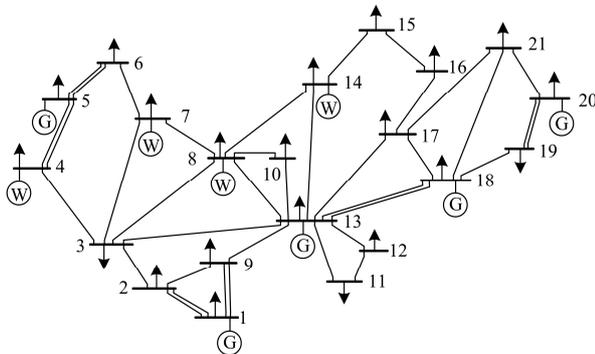


图 2 实际系统等值接线图

Fig. 2 An actual power system equivalent wiring diagram

由表 8 对比可以看出:采用所提运行方式优化与拓扑校正控制的参考电网优化方法和电网结构固定不变下的参考电网优化方法决策的输电容量最优值不同,前者决策的输电容量最优值总体上比后者要小,这是因为前者计及运行方式优化与拓扑校正控制情况,扩大了优化决策解的空间,从而在系统运行时某种负荷水平下解除受电网 KVL 约束制约的输电能力,如在本例中体现在正常负荷模式下停运支路 15-16,在支路 18-21 事故停运情况下投运支路 15-16、停运支路 3-13 等,改善了参考电网优化决策效果。同时也说明了传统的电网结构固定不变

下的参考电网优化方法具有一定的保守性。

表 7 实际系统输电元件数据

Table 7 Branch parameters for an actual power system

输电元件	电抗/ p.u	输电容量/ MW	输电元件	电抗/ p.u	输电容量/ MW
1-2	0.016	326.94	9-13	0.062	272.45
1-2	0.016	326.94	10-13	0.014	272.45
1-9	0.034	326.94	11-12	0.024	272.45
1-9	0.034	326.94	11-13	0.015	326.94
2-3	0.059	272.45	12-13	0.017	326.94
2-9	0.056	272.45	13-14	0.017	272.45
3-4	0.037	272.45	13-17	0.032	326.94
3-7	0.035	272.45	13-18	0.022	326.94
3-8	0.059	272.45	13-18	0.022	326.94
3-13	0.051	272.45	14-15	0.022	272.45
4-5	0.006	326.94	15-16	0.028	272.45
4-5	0.006	326.94	16-17	0.042	272.45
5-6	0.018	326.94	17-18	0.021	326.94
5-6	0.018	326.94	17-21	0.01	326.94
6-7	0.01	326.94	18-19	0.015	272.45
7-8	0.051	272.45	18-21	0.015	326.94
8-10	0.045	272.45	19-20	0.018	272.45
8-13	0.041	272.45	19-20	0.018	272.45
8-14	0.032	272.45	20-21	0.011	326.94

表 8 实际系统输电元件安全容量

Table 8 Security capacity of transmission lines for an actual power system

输电元件	安全容量/MW		输电元件	安全容量/MW	
	考虑运行方式优化	电网结构固定不变		考虑运行方式优化	电网结构固定不变
1-2	326.94	326.94	9-13	272.45	272.45
1-2	326.94	326.94	10-13	272.45	272.45
1-9	326.94	326.94	11-12	272.45	272.45
1-9	326.94	326.94	11-13	326.94	326.94
2-3	272.45	272.45	12-13	326.94	326.94
2-9	272.45	272.45	13-14	282.58	282.58
3-4	272.45	272.45	13-17	403.06	403.06
3-7	272.45	272.45	13-18	326.94	326.94
3-8	272.45	272.45	13-18	326.94	326.94
3-13	272.45	272.45	14-15	296.29	296.29
4-5	326.94	326.94	15-16	272.45	281.38
4-5	326.94	326.94	16-17	296.29	296.29
5-6	326.94	326.94	17-18	326.94	326.94
5-6	326.94	326.94	17-21	326.94	326.94
6-7	326.94	326.94	18-19	346.38	349.82
7-8	272.45	272.45	18-21	397.46	397.41
8-10	272.45	272.45	19-20	272.45	272.45
8-13	272.45	272.45	19-20	272.45	272.45
8-14	274.91	275.06	20-21	326.94	326.94

4 结论

本文针对现有的参考电网评价并无涉及现状电网情况以及未能关联电网运行策略等不足, 提出了考虑运行方式优化和拓扑校正控制的参考电网优化方法。其结论如下:

1) 所提方法能够考虑现状电网实际情况, 适用于在前瞻时间尺度内负荷水平下的电网适应性评估, 能够明确现状电网薄弱环节和投资重点。

2) 所提方法考虑了电网实际运行方式优化以及事故情况下的电网拓扑校正控制安全情况, 有利于克服传统参考电网评价方法的保守性, 避免线路冗余扩容, 提升电网运行规划的经济性。

本研究是参考电网评价研究的重要组成部分。进一步会将其拓展到考虑节点注入不确定性的参考电网鲁棒优化之中, 以适应日益增长的可再生能源发电和多样化负荷带来的节点注入不确定性情形; 此外, 如何提升所提模型的求解效率以满足实际大规模系统的计算需求也是下一步需要深入研究的内容。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 施涛, 朱凌志, 于若英. 电力系统灵活性评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 146-154.
SHI Tao, ZHU Lingzhi, YU Ruoying. Overview on power system flexibility evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 146-154.
- [3] KIRSCHEN D S, STRBAC G. Fundamentals of power system economics[M]. John Wiley & Sons, 2004.
- [4] BOITEUX M. La tarification des demandes en point: application de la théorie de la vente au cout marginal[J]. Revue Générale de l'Electricité, 1949(58): 321-340.
- [5] CONEJO J G, BARTOLOME G T, EXPOSITO A G, et al. ANETO: a system for the automatic generation of theoretical network models[C] // IEEE 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, October 9-11, 2007, Barcelona, Spain: 1-6.
- [6] BUYGI M O, BALZER G, SHANECHI H M. Market-based transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2060-2067.
- [7] MINOIA A. Reference transmission network: a game theory approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 249-259.
- [8] PADHY N P, ROHIT B, MAYANK N. Smart reference networks[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, San Diego, USA: 1-6.
- [9] CALIBJO C C, ALLAN C N. Reference grid performance assessment model for transmission company regulation[C] //

- IEEE Conference on Power & Energy (IPEC), December 12-14, 2012, Ho Chi Minh City, Vietnam: 621-626.
- [10] LEVI V, STRBAC G, ALLAN R. Assessment of performance-driven investment strategies of distribution systems using reference networks[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(1): 1-10.
- [11] 王臻. 参考电网奔德斯分解与协调的优化方法[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [12] 徐伟, 鲍颜红, 周海锋, 等. 基于阻塞分析的输电线路动态扩容[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 15-22.
XU Wei, BAO Yanhong, ZHOU Haifeng, et al. Transmission line dynamic capacity-increase based on congestion analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 15-22.
- [13] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.
ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [14] 刘国静, 韩学山, 杨明. 经济调度中源网间的三种状态分析及验证[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 431-437.
LIU Guojing, HAN Xueshan, YANG Ming. Analysis and verification on three states between source and network in economic dispatch[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 431-437.
- [15] 孙东磊. 电力系统源、网协同调度的理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [16] AMIN K, SHAHIDEHPOUR M, KAMALINIA S. Transmission switching in expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1722-1733.
- [17] VILLUMSEN A, CHRISTOFFER J, BRONMO G, et al. Line capacity expansion and transmission switching in power systems with large-scale wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 731-739.

收稿日期: 2017-06-29; 修回日期: 2017-09-12

作者简介:

孙东磊(1988—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统源网协同理论研究与工程应用技术开发; E-mail: sdusdlei@sina.com

李雪亮(1965—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电网规划理论研究与管理;

韩学山(1959—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作。

(编辑 姜新丽)