

以最小削减及最少启停为特征的空调负荷 双层优化调度策略

杨 阳¹,徐青山¹,戴蔚莺¹,栾开宁²,杨 斌²

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 210024)

摘要:为了维持电网稳定运行、节约调度成本、改善用户的舒适度,在空调负荷的优化调度中提出了以最小削减及最少启停为特征的双层调度策略。沿着负荷最优削减方向,以最小空调削减量为目标,实现空调削减在空间上的优化组合;对于各调控节点下的多台空调,以空调启停数量最少为目标,通过安全开关和调温控制策略的优化组合,满足调控精度的要求。所提双层优化策略在保证电网稳定的同时,有效地降低了空调的削减量,并且在保证调控精度的同时,最大限度地保证了用户的舒适度,降低了调度成本。IEEE 33节点配电网算例的仿真结果验证了所提调度策略的可行性和准确性。

关键词:空调负荷;最小削减量;开关控制;调温控制;双层优化;调度策略

中图分类号:TM 714;TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911035

0 引言

2017年江苏电网高峰用电值已经破 10^8 kW,成为省级电网中负荷最高的电网。在用电高峰时段,电网电压易越限,易出现稳定问题。因此,为了缓解供需紧张和保证电网的稳定运行,夏季削峰是十分必要的措施^[1-2]。空调是构成夏季高峰的最大“元凶”,近年来,空调负荷因为具有良好的需求响应特性,已经成为电网需求响应中具有较大可调潜力的柔性负荷^[3-4]。同时夏季高峰一般为“空调高峰”,使得空调调控成为削峰最直接、最有效的方式之一^[5-7]。

现有文献通常是假设已经得到了一个已知的削减量,如文献[8]假设12:00—13:00时段的负荷削减量为1.7 MW,文献[9]假定了次日12:00—13:00时段每10 min需要削减的负荷功率。很少有文献提出如何确定空调削减量以及如何寻找最小的削减量。以四大火城的南京市为例,其夏季时间长且温度高,2018年5月白天的最高温度已经超过30℃,最高达到35℃,空调使用期基本从5月初一直持续到9月中,时间长达近5个月。如果一天的空调削减量能够减少,不仅可以降低对用户舒适度的影响,还可以节省可观的成本,具有很大的研究价值。现有文献也常假设在1个节点下切除负荷^[10-11],但是一点切除易导致电网稳定问题,而且实际电网中每个节点下一般都会分布着多台空调。文献[12]指出负荷

削减的位置及方向会影响电压稳定裕度。

空调的调控策略一般有开关控制^[13]和调温控制^[14-15],但是现有文献中基本只采用一种调控方式。对大量空调采用长时间的启停操作,对用户舒适度的影响较大,调控的代价也很大^[16]。调温作为一种温和的调控措施,可以在保证用户舒适度的情况下提供一定的负荷削减,但是调温潜力很小。文献[17]假设共有30 000台空调,每台空调的功率为2.5 kW,当调度目标增大为2.5 MW(占总空调聚合功率的3.3%)时,调度结果就已不太理想。实际中对1个节点下的所有空调只进行调温操作很可能无法满足该节点的调控目标。

为此,本文在空调优化调度策略中,以空调的最小削减量及最少启停数为目标,考虑到空调的空间分布,实现空调负荷削减量的减少与用户舒适度的提升。首先研究负荷的最优削减方向,以最小空调削减量为目标,结合多点空调所处的位置,通过空间上的优化组合求出满足电网稳定约束条件下的各调控节点的削减目标;然后对各调控节点下的多台空调,以空调启停数量最少为目标,通过安全开关控制策略与安全调温控制策略的优化组合,在满足调控精度的约束条件下,求解具体的调控方案;最后以IEEE 33节点配电网为例,详细分析并验证了所提双层调度策略的准确性。

1 空调的建模与调控

1.1 空调系统的模型建立

一般用等效热参数模型来模拟空调的热动力过程^[8],即:

$$\begin{cases} T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - (T_{out}^{t+1} - T_{in}^t)\varepsilon & \text{关闭} \\ T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - \eta PR - (T_{out}^{t+1} - \eta PR - T_{in}^t)\varepsilon & \text{开启} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2019-06-06;修回日期:2019-09-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901100);国家自然科学基金资助项目(51577028)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0901100) and the National Natural Science Foundation of China(51577028)

其中, T_{in}^t 为 t 时刻的室内温度; T_{in}^{t+1} 、 T_{out}^{t+1} 分别为 $t+1$ 时刻的室内、室外温度; P 为空调负荷的额定功率; η 为空调能效比, 表示额定制冷量与额定功耗 P 的比值; $\varepsilon = e^{-\Delta h/(RC)}$ 为散热系数, Δh 为仿真间隔, C 为房屋的等效热容, R 为房屋的等效热阻。空调的工作具有周期性, 其室内温度的周期性变化曲线如图 1 所示。图中, $T_s = (T_+ + T_-)/2$ 为空调的设定温度。当室内温度达到温度上限 T_+ 时, 空调开启; 当室内温度达到温度下限 T_- 时, 空调关闭。

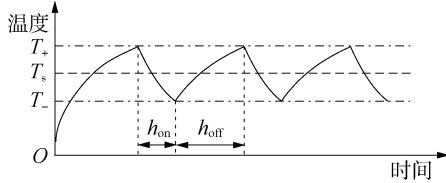


图 1 室内温度的周期性变化曲线

Fig.1 Periodic variation curve of indoor temperature

假设 T_{out} 、 P 、 R 以及 C 为恒定值, 稳态时一个控制周期 h 内的关停时间为 h_{off} , 开启时间为 h_{on} ^[17]。那么可以得到:

$$\begin{cases} h_{off} = RC \ln \frac{T_- - T_{out}}{T_+ - T_{out}} \\ h_{on} = RC \ln \frac{T_+ + \eta PR - T_{out}}{T_- + \eta PR - T_{out}} \end{cases} \quad (2)$$

关停、开启状态下的概率密度函数^[18]为:

$$\begin{cases} f_{off}(T) = \frac{RC}{(h_{on} + h_{off})(T_{out} - T)} \\ f_{on}(T) = \frac{RC}{(h_{on} + h_{off})(PR + T - T_{out})} \end{cases} \quad T \in [T_-, T_+] \quad (3)$$

其中, $f_{off}(T)$ 、 $f_{on}(T)$ 分别为关停、开启状态下的概率密度函数; T 为空调的温度。

1.2 空调调控策略

空调常用的调控策略有开关控制和调温控制 2 种方式, 其中开关控制的响应时间快, 调度潜力大, 但是往往无法保证用户的舒适度; 调温控制的调容量小, 但是可以在尽量不影响用户舒适度的情况下, 长时间地对空调进行调控^[19]。本文拟采用开关控制与调温控制相结合的方法, 在满足调控要求的情况下使开关控制的空调数目最少, 力求保证用户最大的舒适度。当调温可以满足削减量要求时, 直接采用调温操作; 当全部空调采用调温控制也无法满足削减量要求时, 则以空调启停数量最小为目标, 先尽量使用调温控制满足削减要求, 减少空调启停的数量。

1.2.1 空调的聚类分组

为了支持空调的控制策略、保证空调的多样性, 将空调的控制周期 h 分为多种状态, 每个温度段对

应一种状态, 对空调进行分组, 令每组空调中包含所有的状态, 且数量相同。本文假设每组空调中包含 N_h 种状态。

1.2.2 安全开关控制策略

对空调进行关停操作时, 当调控结束后, 若是直接开启空调, 恢复原来的温度设定值, 空调的多样性会发生变化, 空调群的功率会产生一定的振荡^[19-20]。为了使开关控制后的空调恢复到原始的运行状态, 本文采用如图 2 所示的安全开关控制策略, 步骤如下:

(1) 如图 2(a) 所示, T_{0-} 、 T_{0+} 分别为初始的空调温度下限、上限, 某一时刻接到空调关停的命令后, 处于开状态的空调关闭, 并保存当时空调显示的温度;

(2) 所有空调均处于关闭状态, 且温度不断上升达到 T_+ , 如图 2(b) 所示;

(3) 调控结束后, 设定空调温度上、下限分别为 T_+ 、 T_{0-} , 空调显示室内温度逐渐降低直到 T_{0-} , 如图 2(c) 所示;

(4) 再次设定空调温度上、下限分别为 T_{0+} 、 T_{0-} , 当步骤(1)中关闭的空调再次处于关闭状态(如图 2(d) 所示)并达到相同的温度时, 空调自动开启, 恢复到原始的运行状态。

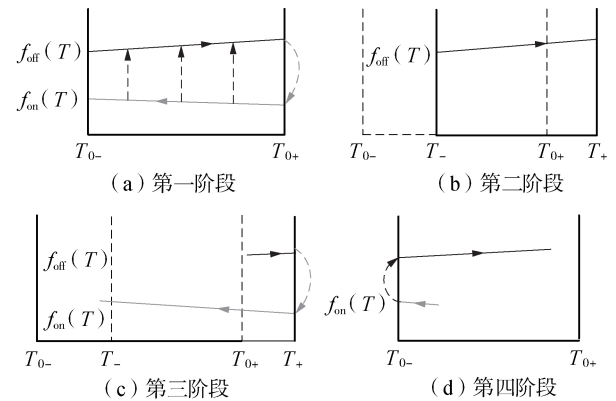


图 2 安全开关控制策略

Fig.2 Safe switching control strategy

设定空调功率为 P , 则关闭 1 组空调可提供的功率削减量为 $p = N_h P$ 。

1.2.3 安全调温控制策略

当对空调进行调温操作时, 直接改变温度的上下限, 空调温度出现新的不连续分布, 同样会破坏空调运行状态的多样性, 引起功率的波动^[17-18]。为了使调温后的空调不发生功率振荡, 本文采用如图 3 所示的安全错时调温控制策略, 步骤如下:

(1) 如图 3(a) 所示, T_{0-} 、 T_{0+} 分别为初始的空调温度下限、上限, 某一时刻接到调温的命令;

(2) 将处于关闭状态的空调的温度上限、下限分别改为 T_+ 、 T_{0-} , 直到这些空调开启, 如图 3(b) 所示,

然后将温度的上限、下限分别改为 T_+ 、 T_- , 修改后的空调运行如图3(c)所示;

(3)调温后的空调就会按照图3(d)所示的过程运行,当调控结束时,仍按照相同的原理对温度的上限以及下限进行错时调节,直到恢复原来的运行状态。

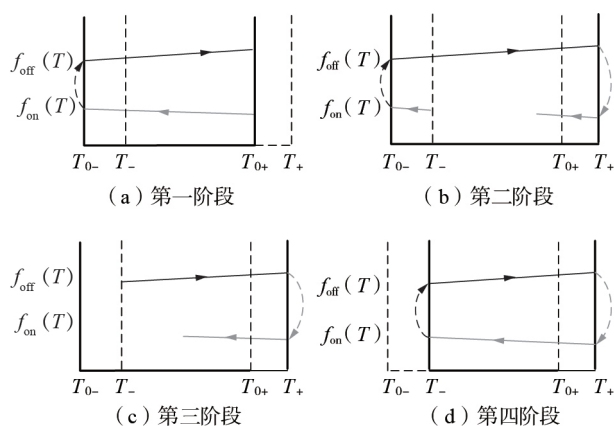


图3 安全调温控制策略

Fig.3 Safe thermoregulation control strategy

设定空调功率为 P , 将1组空调温度的下限 T_{0-} 、上限 T_{0+} 分别增长到 T_- 、 T_+ , 按照式(2)计算提高温度前(后)的关停时间 h_{0-off} (h_{off}) 和开启时间 h_{0-on} (h_{on}), 则该组空调可以提供调控的功率削减值 p 为^[18]:

$$p = \left(\frac{h_{0-on}}{h_{0-off} + h_{0-on}} - \frac{h_{on}}{h_{on} + h_{off}} \right) N_h P \quad (4)$$

2 负荷削减方向

一般研究空调调度的文献中都是假定已知空调的削减量,但是研究如何在保证电网稳定的情况下使削减的空调最少,具有很大的研究价值。世界各地所发生的不少由于电压崩溃导致电网瓦解的大事件,大多是由节点电压的大幅下降导致的^[21],因此本文最小削减量的确定重点考虑了电压稳定裕度(负荷裕度)和电压不越限这2个条件,以此反映系统的稳定性。

基于连续潮流的电压稳定裕度计算可知,不同负荷增长方向对应于不同的系统崩溃点。最危险的负荷增长方向是系统失稳最快的方向^[22]。

连续潮流的基本方程可以描述为:

$$f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = 0 \quad (5)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为电压幅值和相角; $\boldsymbol{\lambda}$ 为负荷参数。当负荷沿某一方向增长到电压失稳时,系统的雅可比矩阵 $\partial f / \partial \mathbf{x}$ 奇异,系统的临界点为 $(\mathbf{x}', \boldsymbol{\lambda}')$, 则有:

$$\begin{cases} f(\mathbf{x}', \boldsymbol{\lambda}') = 0 \\ \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}'} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

当处于临界状态时,各节点的负荷值构成了超平面 Σ , 可证明 Σ 在临界点存在一法向量 $\boldsymbol{\eta}'$ ^[22], 如式(7)所示。

$$\boldsymbol{\eta}' = \mathbf{v}^T \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\lambda}} \bigg|_{\boldsymbol{\lambda}=\boldsymbol{\lambda}'} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{v}^T$ 为雅可比矩阵零特征值相对应的左特征向量。

假设系统的初始运行点为 $(\mathbf{x}_0, \boldsymbol{\lambda}_0)$, 负荷裕度为 $d = \|\boldsymbol{\lambda}' - \boldsymbol{\lambda}_0\|$, 其最小值即为最小的负荷裕度。

$$d^2 = (\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\lambda}_0)^T (\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\lambda}_0) \quad (8)$$

将式(8)对 $\mathbf{x}$ 求导,可得极值条件下有:

$$2(\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\lambda}_0)^T \frac{d\boldsymbol{\lambda}}{d\mathbf{x}} = 0 \quad (9)$$

分析可知:当 $\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\lambda}_0$ 为超平面 Σ 在点 $(\mathbf{x}', \boldsymbol{\lambda}')$ 处的法向量时,距离最短,此时的负荷增长方向是最危险的负荷增长方向。

最优的负荷削减方向即为最危险的负荷增长方向的反方向,即法向量的反方向 $-\boldsymbol{\eta}'$ 。若按此方向削减负荷,电压稳定裕度增加得最快。因此最小削减量的确定将令各调控节点沿着最优削减方向进行削减。具体计算步骤如下:

(1)对系统进行潮流计算,得到初始运行电压及负荷情况 $(\mathbf{x}_0, \boldsymbol{\lambda}_0)$;

(2)假设最初的负荷增长方向为 $\mathbf{s}$, 利用连续潮流法可求得 Σ 的临界点;

(3)求取相应的左特征向量 $\mathbf{v}^T$, 根据式(7)计算当前临界点的法向量 $\boldsymbol{\eta}$;

(4)若满足 $\|\mathbf{s} - \boldsymbol{\eta}\| < \varepsilon_1$ (ε_1 为误差), 则方向 $\mathbf{s}$ 即为最危险的负荷增长方向,若不满足,则令 $\mathbf{s} = \boldsymbol{\eta}$, 重复步骤(2)~(4);

(5)相应的最优负荷削减方向为 $-\mathbf{s}$ 。

3 以最小削减与最少启停为特征的双层优化调度策略

3.1 上层空调削减量最小

假设系统中 PQ 节点的编号为 1— m , PV 节点的编号为 $m+1$ — n 。PQ 节点都有可调控的空调群,且节点的可调度潜力分别为 $C_1, C_2, \dots, C_m$ 。上层削减量最小的目标函数可表示为:

$$F_1 = \min P_{\text{cut}} = \sum_{l=1}^m e_l P_{cl} \quad (10)$$

其中, P_{cut} 为总的空调削减量; $S_{cl} = P_{cl} + jQ_{cl}$ 为节点 l 的负荷削减量, P_{cl} 和 Q_{cl} 分别为节点 l 的空调有功功率、无功功率削减量 ($-\mathbf{s}$ 为最优的负荷削减方向); e_l 为节点 l 的权重。

等式约束为:

$$\begin{cases} P_i - P_{ci} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) & i=1,2,\dots,n \\ Q_i - Q_{ci} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) & i=1,2,\dots,n \\ -[S_{c1}, \dots, S_{cl}, \dots, S_{cm}] = -ks \\ \sum_{l=1}^m P_{cl} = P_{cut} \\ P_{cl} = 0 \quad l=m+1, m+2, \dots, n \end{cases} \quad (11)$$

不等式约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{cl} \leq C_l & l=1,2,\dots,m \\ \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i & i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (12)$$

其中, P_i 、 Q_i 分别为削减前节点 i 的有功功率和无功功率; P_{ci} 、 Q_{ci} 分别为削减后节点 i 的有功功率和无功功率; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、节点 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 分别为节点 i 与节点 j 之间的电导、电纳、电压相角差; $\bar{V}_i$ 、 $\underline{V}_i$ 分别为节点 i 的电压上限、下限; k 为比例系数。

对于优化问题采用遗传算法进行求解, 由于节点的越限是由空调调控导致的, 所以对空调的削减必然会改善电压的分布, 因此本文优化问题一定会收敛。

3.2 下层空调启停数量最少

假设 3.1 节中最小空调削减量对应的各节点的空调削减目标分别为 P_{c1} 、 P_{c2} 、 $\dots$ 、 P_{cm} , 本节依次对各节点进行最优调度。以节点 l 为例, 其需要削减的空调量为 P_{cl} , 假设该节点下共有 N 组空调。一般用户舒适度越低, 则调控的成本越大。因此为了尽量减少调控成本, 同时也为了最大限度地保障用户的利益, 在进行下层调控时以空调启停数量最少为目标。本文采用开关控制和调温控制相结合的方式, 1 组空调开关控制的削减量为几千瓦级, 而调温控制的削减量为几百瓦级, 调温控制可以较为精细地控制削减量, 一般可满足调控的精度要求。

为了使空调启停数量最少, 则需要在满足调控目标时优先发挥空调调温的潜力。由于空调温度只能整数调节, 为了保证用户的舒适度, 调温有提高 1°C 和提高 2°C 这 2 种方案。所以本文共有 4 种调控策略: ①不调控, ②调高 1°C , ③调高 2°C , ④关停。 $p_{i,j}$ 为第 i 组空调在调控策略 j 下提供的削减量; $s_{i,j}$ 为表征第 i 组空调是否采取调控策略 j 的状态变量, 若采取则取值为 1, 若不采取则取值为 0, 例如 $s_{i,2} = 1$ 表示第 i 组空调采取调控策略 ②, 即调高 1°C 。节点 l 实际削减的空调量 P_{cl_real} 为:

$$P_{cl_real} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^4 s_{i,j} p_{i,j} \quad (13)$$

因此下层空调关停数量最小的目标函数可表示为:

$$F_2 = \min \sum_{i=1}^N s_{i,4} \quad (14)$$

1 组空调只能采取一种调控策略, 且调控时也要满足调度偏差 δ 的要求, 即约束条件如式 (15) 所示。

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{j=1}^4 s_{i,j} \leq 1 \\ \left| \frac{P_{cl_real} - P_{cl}}{P_{cl}} \right| \leq \delta \end{cases} \quad (15)$$

3.3 调度流程

本文提出了一种以最小削减及最少启停为特征的空调负荷双层优化调度策略。具体步骤如下:

- (1) 根据预测得到的第二天高峰时的负荷情况, 计算该场景下的最优负荷削减方向;
- (2) 计算各节点下空调的可调控潜力, 确定电压稳定约束及各节点可调控潜力约束;
- (3) 以最小空调削减量为目标, 利用遗传算法进行求解, 得到各节点的空调削减量;
- (4) 对各节点下的空调按照状态进行聚类分组, 使得每组中包含所有的状态, 并且状态数量相同;
- (5) 以最小空调关停数量为约束, 以调控精度为约束, 对各节点下的空调以组为单位依次进行安全调控策略的组合规划;
- (6) 调控结束后对空调进行恢复, 并保持原有状态的多样性。

4 算例分析

4.1 系统及场景简介

本文以 IEEE 33 节点系统为算例系统, 拓扑结构如图 4 所示。对系统进行等比例扩大, 使得各节点下的空调能达到一定的规模。节点 1 为平衡节点, 节点 2—33 为 PQ 节点, 假设各节点下都接有一定数量的空调, 并且空调都可以进行调控。假设夏季某日 13:00, 根据预测室外温度为 36°C , 各节点的负荷有功功率相较于平时有所增大 (假设增大 1.5 倍), 此时多节点出现电压越限问题, 电压稳定裕度也大幅下降, 需要对空调进行削减使得电网达到稳定状态, 电压越限较为严重的节点如表 1 所示 (表中电压为标么值)。电力公司需要制定负荷削减方案, 时段为 13:00—13:40, 时长 40 min。

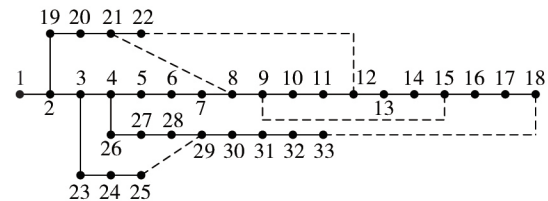


图 4 IEEE 33 节点系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of IEEE 33-bus system

表1 高峰时节点电压越限情况

Table 1 Node voltage overlimit situation in peak period

节点	电压	节点	电压	节点	电压	节点	电压
14	0.8855	16	0.8815	18	0.8778	32	0.8864
15	0.8834	17	0.8787	31	0.8876	33	0.8860

空调的平均额定功率为1.2 kW,能效比为3;房屋的等效电阻 $R = 5.56 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{kW}$,等效热容 $C = 0.18 \text{ kW}\cdot\text{h}/^{\circ}\text{C}$;各节点处空调的初始温度随机分布在23~25 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,温度上、下限的差值设定为1 $^{\circ}\text{C}$,即 $T_+ - T_- = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。空调有4种调控策略:①不调控,②上调1 $^{\circ}\text{C}$,③上调2 $^{\circ}\text{C}$,④关停。

4.2 上层最小负荷削减量的仿真计算

4.2.1 计算最危险的负荷增长方向

为了计算该场景下的最优负荷削减方向,按照第3节所述策略,首先计算最危险的负荷增长方向。考虑到文章的篇幅,表2给出了部分节点计算所得最危险的负荷增长方向。

表2 部分节点最危险的负荷增长方向

Table 2 Most dangerous load growth direction of some nodes

节点	有功方向	无功方向	节点	有功方向	无功方向
4	0.9377	0.3473	30	0.5145	0.8575
15	0.9957	0.0922	32	0.9667	0.2557

图5为利用连续潮流法并基于最危险的负荷增长方向计算所得电压稳定裕度(图中电压为标么值,后同)。由图可以看出,在高峰时段按最危险的负荷增长方向得到的电压稳定裕度为4.758。图6为随机定义负荷增长的方向并以节点3为例,对比了不同负荷增长方向下的电压稳定裕度。由图可以看出,最危险负荷增长方向下确实的电压稳定裕度最小。同时也可以看出不同负荷增长方向对应不同的电压稳定裕度,用随机选取的增长方向计算所得的稳定裕度会过于乐观,采用最危险负荷增长方向计算所得的稳定裕度能够更为客观地反映电压稳定裕度。

4.2.2 计算最小空调削减量

沿着各节点的最优负荷削减方向,取电压约束

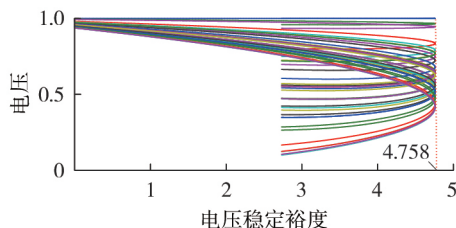


图5 最危险增长方向下的电压稳定裕度

Fig.5 Voltage stability margin under dangerous load growth direction

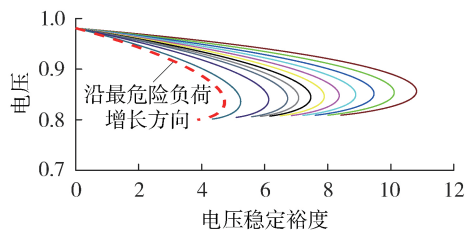


图6 不同负荷增长方向下节点3的电压稳定裕度

Fig.6 Voltage stability margin of Node 3 under different load growth directions

范围为[0.9, 1.1] p.u.。计算各节点的可调控潜力,通过遗传算法进行优化求解,得到最小空调削减量为865.1654 kW。由于相较于有功功率,无功功率的削减要容易得多,并且成本也低得多(如并联电容器),因此本文重点考虑有功功率的削减。

由于电网高峰时段还存在频率问题,一般最小削减量满足频率稳定问题,在特殊的情况下:若求得的最小削减量 $P_{\text{cut}} < \Delta P$,则取两者的最大值。 $k_p = \Delta P / \Delta f$, k_p 为静态频率特性系数, Δf 为频率偏差相对量, ΔP 为 Δf 相对应的负荷变化量。

本文求得的最小削减量满足频率稳定要求。求得的削减量最小值共需21个节点参与削减,各节点空调的削减权重如表3所示(没有列出的节点为不参与削减的节点)。

表3 最小负荷削减量下各节点空调的削减值

Table 3 Reduction of air conditioning for each node under minimum load reduction

节点	权重/%	节点	权重/%	节点	权重/%
6	0.70	13	5.14	27	0.88
7	5.28	14	10.47	28	0.91
8	8.19	15	5.15	29	3.72
9	4.61	16	5.17	30	10.45
10	5.13	17	5.19	31	4.86
11	3.85	18	7.87	32	4.93
12	5.13	26	0.84	33	1.65

图7为负荷削减后最危险增长方向下的电压稳定裕度。对比图5可知,电压稳定裕度由4.758增长至5.446。随机生成6种不同的削减场景,即随机生成被削减的节点和节点的削减量,保证总的削减量相同且都为最优负荷削减方向,计算不同削减场景下的电压值,结果如图8所示,图中 U_{lim} 为电压的下限值, U_{opt} 为按照表3所示权重对各节点空调进行削减得到的优化电压值。由图可以看出,6种随机削减场景下的电压 $U_{\text{c1}} - U_{\text{c6}}$ 仍存在电压越限情况,有些越限情况甚至与削减前的越限程度相近。而按照表3所示权重对各节点空调进行削减,则可以保证 U_{opt} 上的各节点不越限。计算得到的最小削减量确实可以在保证系统稳定的情况下,减少空调的削减量。图9为削减前后各节点的负荷功率。

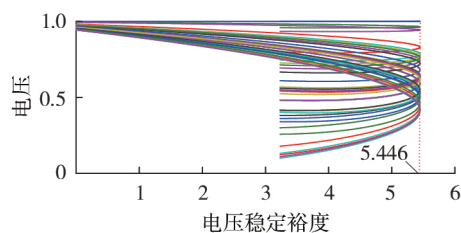


图 7 负荷削减后最危险增长方向下的电压稳定裕度

Fig.7 Voltage stability margin under most dangerous growth direction after load reduction

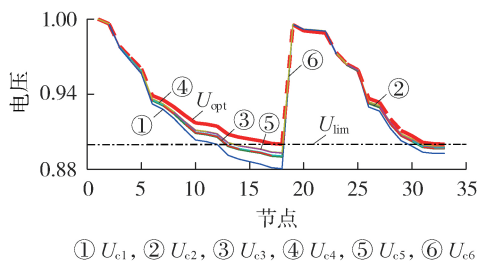


图 8 相同削减量、不同削减组合下的电压

Fig.8 Voltage under same reduction power and different reduction combinations

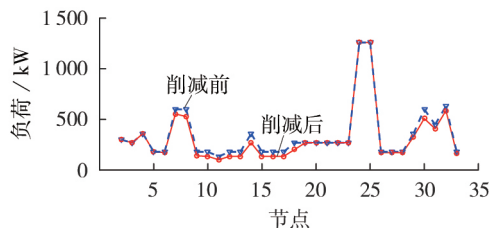


图 9 削减前后各节点的负荷功率

Fig.9 Load power of each node before and after reduction

4.3 下层最小空调关停数量的仿真计算

为了尽量保证用户的舒适度,以空调关停数量最小为目标,对空调按组为单位进行调度,调度偏差约束 $\delta=5\%$ 。将调度周期分为7种状态,每组空调中有7台空调。则1组空调采用开关控制、上调 1°C 调控策略和上调 2°C 调控策略得到的削减量分别为8.4、0.423、0.845 kW。图10为各调控节点的调控精度。由图可知,各节点的调度偏差都小于2%,虽然部分节点的调度偏差较大,约为2%,但是实际调度值与计划削减量的大小是基本相同。只是因为部分节点的调度量太小,所以偏差较大,实际调度偏差量均在几百瓦。计划总削减量为865.1654 kW,实际调度值为865.058 kW,由于节点正负抵消,总误差很小,小于0.5%。参与调度的21个节点下共有616组空调,每组有7台空调。图11为各调度节点的空调总组数、参与调温的空调总组数和直接关停的空调总组数。由图可以看出,在保障调度精度的同时,各节点直接关停的组数还是很少的,21个调度节点总的空调关停数量为55组,共385台,约占空调组数的

8.9%。但若全部空调采用直接关停策略,则至少需要关停103组(共721台)空调。

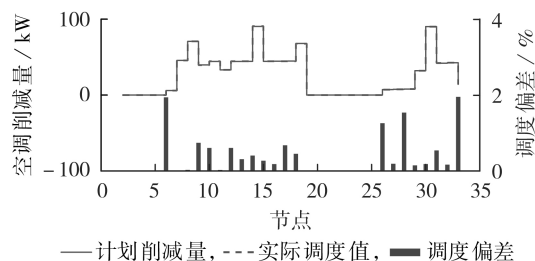


图 10 各节点的调度偏差

Fig.10 Scheduling deviation of each node

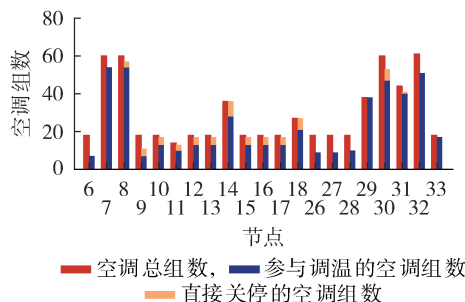


图 11 各调控节点参与调温和关闭的空调组数

Fig.11 Number of air conditioning units involved in temperature regulation and shutdown

5 结论

本文提出了一种以最小削减与最少启停为特征的双层优化调度策略。该策略在上层实现了空调削减在空间上的优化组合,在下层实现了安全开关和调温控制策略的优化组合,对IEEE 33节点配电网算例进行仿真分析可以得到以下结论。

(1)不同负荷增长方向对应不同的电压稳定裕度,采用最危险负荷增长方向得到的电压稳定裕度能够涵盖极端情况,更为真实地反映电网的稳定情况。沿着最优负荷削减方向,电压稳定裕度增长得最快。

(2)上层优化得到的最小空调削减量可以实现减少总削减量的同时提高相同或者更高的稳定性,有效地降低了空调削减量以及调度成本。

(3)下层优化得到的最小空调关停数量可以达到各节点调控误差小于2%的精度,总误差小于0.5%,并且能够尽可能降低空调的关停数量,提高了用户的舒适度。

空调的响应具有一定的不确定性,分析不确定性对调控精度以及调控策略的影响将是笔者下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 郭建龙,文福拴. 考虑削峰填谷的电动出租车充电负荷影响因素调节方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):242-248.

- GUO Jianlong, WEN Fushuan. Methods of influencing factor regulation considering load shifting for electric taxis charging load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 242-248.
- [2] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2-9, 189.
- DING Yi, HUI Hongxun, LIN Zhenzhi, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 2-9, 189.
- [3] 米增强, 张文彦, 贾雨龙. 柔性负荷虚拟电厂下冰蓄冷空调的优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 15-20, 27.
- MI Zengqiang, ZHANG Wenyan, JIA Yulong. Optimal control strategy of ice storage air conditioning under flexible load virtual power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 15-20, 27.
- [4] 王剑晓, 钟海旺, 夏清, 等. 基于成本-效益分析的温控负荷需求响应模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 45-53.
- WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Model and method of demand response for thermostatically-controlled loads based on cost-benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 45-53.
- [5] ESCRIVÁ-ESCRIVÁ G, SEGURA-HERAS I, ALCÁZAR-ORTEGA M. Application of an energy management and control system to assess the potential of different control strategies in HVAC systems[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(11): 2258-2267.
- [6] 徐青山, 杨辰星, 颜庆国. 计及规模化空调热平衡惯性的电力负荷日前削峰策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 156-163.
- XU Qingshan, YANG Chenxing, YAN Qingguo. Strategy of day-ahead power peak load shedding considering thermal equilibrium inertia of large-scale air conditioning loads[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 156-163.
- [7] 陈东文, 刘育权, 李勇, 等. 用于削减工业园区用电功率峰值的蓄冷空调系统的动态建模和优化控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 186-192.
- CHEN Dongwen, LIU Yuquan, LI Yong, et al. Dynamic modeling and optimal control of cold-storage air-conditioning system for reducing peak load of industrial park[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 186-192.
- [8] 徐青山, 吴泉, 杨斌. 考虑状态差异性聚类的空调负荷直接负荷控制动态优化方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 33-42.
- XU Qingshan, WU Xiao, YANG Bin. Dynamic optimization method of direct load control for air-conditioning load considering status diversity clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 33-42.
- [9] 高赐威, 李倩玉, 李扬. 基于DLC的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1546-1555.
- GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [10] 苏建军, 郭跃进, 刘萌, 等. 紧急切负荷措施的温控负荷控制策略及概率模型[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 911-917.
- SU Jianjun, GUO Yuejin, LIU Meng, et al. Strategy and probability model for thermostatically controlled loads in emergency load shedding system[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 911-917.
- [11] LU N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.
- [12] 刘林, 王锡凡, 丁晓莺. 基于填充函数方法的最小静态负荷裕度计算[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 26-31.
- LIU Lin, WANG Xifan, DING Xiaoying. A novel filled function based closest static load margin computation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 26-31.
- [13] LEE T F, CHO M Y, HSIAO Y C, et al. Optimization and implementation of a load control scheduler using relaxed dynamic programming for large air conditioner loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 691-702.
- [14] HONG Y Y, LIN J K, WU C P, et al. Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1603-1610.
- [15] 朱宇超, 王建学, 曹晓宇. 中央空调负荷直接控制策略及其可调度潜力评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 227-234.
- ZHU Yuchao, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu. Direct control strategy of central air-conditioning load and its schedulable potential evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 227-234.
- [16] 刘萌, 梁雯, 张岩, 等. 计及空调负荷群控制的源-荷协同优化调度模型[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1230-1236.
- LIU Meng, LIANG Wen, ZHANG Yan, et al. Cooperative generation-load optimal dispatching model considering air-conditioning load group control[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1230-1236.
- [17] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579-5589.
- ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [18] KUNDU S, SINITSYN N. Safe protocol for controlling power consumption by a heterogeneous population of loads[C] // 2012 American Control Conference (ACC). Montreal, QC, USA: IEEE, 2012: 2947-2952.
- [19] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167.
- SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167.
- [20] SINITSYN N A, KUNDU S, BACKHAUS S. Safe protocols for generating power pulses with heterogeneous populations of thermostatically controlled loads[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 67: 297-308.
- [21] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 91-97.
- ZHAO Jinquan, ZHANG Boming. Summarization of continuation power flow and its applications in static stability analysis of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 91-97.
- [22] 谢仕炜, 胡志坚, 宁月. 考虑最优负荷削减方向的电网多目标分层随机机会约束规划[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 35-42, 51.

Directional protection strategy of power inversion caused by chain fault of AC/DC hybrid system

LUO Rui, FAN Yanfang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Aiming at the adaptability problem of directional pilot protection under power inversion caused by the chain faults in AC/DC hybrid system, taking the single-phase grounding fault with high incidence of AC lines as an example, based on the analysis of the influence of the transition resistance on power inversion and frequency offset of the fault current, a local information criterion method based on compensating voltage mutation is proposed according to the relationship among the bus voltage mutation, fault point voltage mutation and compensation voltage mutation. The proposed method can distinguish internal and external faults only by the local fault information without the participation of communication equipment. It is not affected by the power inversion of the AC/DC hybrid system and can modify the fault current by frequency correction algorithm. The validity of the proposed method is verified by the modeling simulation in PSCAD software.

Key words: AC/DC hybrid; chain fault; power inversion; compensating voltage; local information tuning calculation; frequency offset correction

(上接第 182 页 continued from page 182)

XIE Shiwei, HU Zhijian, NING Yue. Multi-objective hierarchical stochastic chance-constrained programming considering optimal load-shedding direction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 35-42, 51.

作者简介:

杨 阳(1994—),女,安徽滁州人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为负荷优化调度(E-mail: yangyang9296@163.com);



杨 阳

徐青山(1979—),男,江苏泰州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为新能源发电、负荷资源优化调度以及智能配电网运行与规划(E-mail: xuqingshan@seu.edu.cn);

戴蔚莺(1995—),女,江苏南京人,博士研究生,主要从事智能电网调度以及需求侧管理方面的研究工作(E-mail: daiweiying@seu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Bi-level optimal dispatch strategy of air-conditioning load with minimum reduction and minimum start-stop number as characteristics

YANG Yang¹, XU Qingshan¹, DAI Weiying¹, LUAN Kaining², YANG Bin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to maintain the stable operation of power grid, save dispatch cost and improve users' comfort, a bi-level optimal dispatch strategy with minimum reduction and minimum start-stop number as characteristics is proposed in the optimal dispatch of air-conditioning load. Along the optimal direction of load reduction, the optimal combination of air-conditioning load reduction in space is realized with the minimum air-conditioning reduction as its objective. For the multiple air-conditioners at each control node, their requirements of control accuracy are met through safety switch and temperature control strategy with the minimum start-stop number as the goal. The proposed bi-level optimal strategy not only ensures the stability of power grid, but also effectively reduces the reduction of air-conditioning, and at the same time, ensures the control accuracy, maximizes the users' comfort and reduces the dispatch cost. Simulative results of IEEE 33-bus distribution network verify the feasibility and accuracy of the proposed dispatch strategy.

Key words: air-conditioning load; minimum reduction; switch control; temperature control; bi-level optimization; dispatch strategy