

含有载调压调容配变的城市配电网节能降损动态优化模型

梁国开,方 健,王志军,覃 煜,崔屹平,尹 旷,罗思敏,蒋 健

(中国南方电网广州供电局有限公司,广东 广州 510000)

摘要:首先分析了电能替代下城市配电网的负荷特征,并根据有载调压调容配变潮流计算等值电路推导有功损耗计算式;然后以全网电能损耗最小为目标函数,提出了一种含有载调压调容配变的配电网节能降损动态优化模型,并采用并行协同进化算法进行求解,获得有载调压调容配变等设备动作方案。最后,通过某实际55节点配电网的仿真分析,验证了所建模型的有效性。

关键词:配电网;有载调压调容配变;节能降损;动态优化

中图分类号:TM 421

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911019

0 引言

国家发展改革委、国家能源局等单位联合印发的《关于推进电能替代的指导意见》(发改能源[2016]1054号)指出,电能具有清洁、安全、便捷等优势,实施电能替代对于推动能源消费革命、落实国家能源战略、促进能源清洁化发展意义重大,是提高电煤比重、控制煤炭消费总量、减少大气污染的重要举措。但是,电能替代的实施会增大供电负荷峰谷差,给配电网带来2个方面的问题:①低峰负荷时,配变低压侧母线电压较高,电压容易越上限,而高峰负荷时,配变低压侧母线电压较低,容易出现低电压问题;②配变容量低于供电区域高峰负荷时,短时负荷激增会导致配变过载,严重时甚至引发大面积停电,但配变容量大于或等于供电区域高峰负荷时,变压器大部分时间运行在轻载状态,不利于变压器经济运行。有载调压调容配变^[1-2]是一种节能型配电变压器,可通过有载调压开关和有载调容开关,在不停电状态下实现电压的调整和容量的切换,确保输出电压不越限,并有效降低配变空载损耗。该类型配变适用于负荷峰谷差较大的区域,能解决农网因用电负荷季节性或周期性变化造成的空载损耗高及低电压等问题,已在北京、山东、浙江等27个省市广泛应用,是提高配电网供电可靠性和设备利用率的重要技术手段。

国内外已对含有载调压调容配变的工作原理、结构设计等开展了研究。文献[3]研究有载调压调容配变在大容量和小容量状态下的短路阻抗计算方

法;文献[4-6]分析有载调容开关与调压开关过渡电阻的匹配关系,给出有载调压开关的参数设计和环流抑制方案;文献[2]还提出可跟踪负荷变化和自动调压的自适应负荷型配变结构及控制原理。目前,有载调压调容配变技术已相对成熟,DL/T 1853—2018《10 kV有载调容调压变压器技术导则》等标准已制定完成。针对有载调压调容配变的经济运行优化,文献[7]研究了有载调容变压器经济运行切换位置参考值,提出基于模糊决策法的最佳容量调节点选择方法;文献[8-9]分别研究了有载调压调容配变的不同容量状态运行时间与负载率之间的关系,提出有载调压调容配变的安全经济控制方案。前述研究主要针对单台有载调压调容配变的经济运行策略,尚未对含多台有载调压调容配变的配电网优化运行开展研究。对此,文献[10]建立了包括电容器无功补偿、配变有载调压、分布式电源无功调节、网络重构等调节措施的主动配电网综合无功优化模型;文献[11]则在考虑变压器有载调压的基础上,提出含电压不可行节点的柔性目标无功优化模型。但前述研究仅考虑配电变压器的有载调压功能,没有同时计及有载调压和调容的切换运行。有载调压调容配变兼具调压和调容功能,其运行中的电压调整会影响配变损耗,使得最佳调容临界负载与额定条件下的调容临界负载有明显差异,因而单台有载调压调容配变的容量调节策略无法适用于含多台有载调压调容配变的配电网最优运行。因此,为降低电能替代下配电网的电能损耗,需要研究含有载调压调容配变的配电网优化运行问题。

本文以电能替代下城市配电网为研究对象,研究含有载调压调容配变的城市配电网节能降损动态优化问题。首先对电能替代下的城市配电网负荷特征进行了分析,并根据有载调压调容配变潮流计算等值电路推导出有功损耗计算式,然后建立含有载调压调容配变的城市配电网节能降损动态优化模型,

收稿日期:2019-01-23;修回日期:2019-09-24

基金项目:广州供电局有限公司专项科技创新项目(GZHKJ-XM20160054)

Project supported by the Special Science and Technology Innovation Project of Guangzhou Power Supply Co., Ltd. (GZHKJXM20160054)

采用并行协同进化算法 IPCCD-EA (Improved Parallel Cooperative Co-evolutionary Differential Evolution Algorithm)^[12]进行求解,获得有载调压调容配变等设备动作方案,以解决电能替代后配电网负荷特征发生改变引起的电压越限和配变电能损耗较大的问题。

1 电能替代下有载调压调容配变损耗分析

电能替代在缓解大气污染的同时,给配电网安全稳定运行带来了挑战,为分析电能替代对城市配电网负荷特性的影响,本文以餐饮类用户“气改电”为例,绘制电能替代前后餐饮类负荷的配变日负荷曲线,如图 1 所示。图中, $P_{\max 1}$ 为电能替代前日最大负荷; $P_{\max 2}$ 为电能替代后日最大负荷。

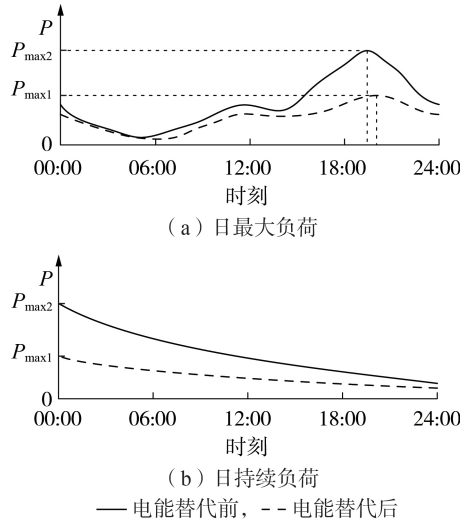


图 1 餐饮类负荷的配变日负荷曲线

Fig.1 Daily load curve of distribution transformer for restaurants

由图 1 可见,午餐时间和晚餐时间为餐饮类负荷的 2 个峰值,电能替代会整体提高替代点的高峰负荷,且晚餐时间新增负荷最多,而低谷负荷在替代前后几乎不变,由此显著加大了餐饮类负荷的峰谷差,进而加重了配电网低电压问题,增加了配变有功损耗。有载调压调容配变有着多个调压档位和 2 个运行容量,能够有效应对电能替代下的负荷变化,即通过有载调压开关改变高压绕组抽头位置,调整配变输出电压,通过有载调容开关切换配变运行容量,降低配变电能损耗。因此,为电能替代点配置有载调压调容配变能够有效解决电能替代后负荷特性变化引起的电压降低和有功损耗增加的问题。

基于附录 A 中有载调压调容配变潮流计算等值电路计算配电网潮流,然后根据有载调压调容配变所在节点潮流分布,考虑无功功率引起的有功损耗,得到时段 t 有载调压调容配变的有功损耗 $P_{\text{Tloss}}(t)$ 为:

$$P_{\text{Tloss}}(t) = \begin{cases} \frac{(P_{\text{OH}} + K_Q I_{\text{OH}} \% S_{\text{NH}}) U_i^2(t)}{U_N^2} + \frac{(P_{\text{kH}} + K_Q U_{\text{kH}} \% S_{\text{NH}}) S^2(t) U_N^2}{S_{\text{NH}}^2 U_i^2(t)} & S(t) \geq S_{\text{opt}} \\ \frac{(P_{\text{OL}} + K_Q I_{\text{OL}} \% S_{\text{NL}}) U_i^2(t)}{U_N^2} + \frac{(P_{\text{kL}} + K_Q U_{\text{kL}} \% S_{\text{NL}}) S^2(t) U_N^2}{S_{\text{NL}}^2 U_i^2(t)} & S(t) < S_{\text{opt}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $S(t)$ 为时段 t 配变的负载功率; S_{opt} 为配变调容临界负载功率; S_{NH} 、 S_{NL} 分别为有载调压调容配变的大、小额定容量; P_{OH} 、 P_{OL} 分别为有载调压调容配变大、小容量下的空载损耗; P_{kH} 、 P_{kL} 分别为有载调压调容配变大、小容量下的短路损耗; $U_{\text{kH}}\%$ 、 $U_{\text{kL}}\%$ 和 $I_{\text{OH}}\%$ 、 $I_{\text{OL}}\%$ 分别为有载调压调容配变大、小容量下的短路电压百分值和空载电流百分值; U_N 为变压器低压侧额定电压; $U_i(t)$ 为时段 t 配变低压侧节点 i 的电压幅值; K_Q 为无功经济当量,即无功损耗折算为有功损耗的系数。由式(1)可知,有载调压调容配变的有功损耗与该配变低压侧节点 i 的电压幅值、配变负载功率和配变调容临界负载有关,合理选择调容临界负载能有效降低有载调压调容配变的电能损耗。

图 2(a) 给出了大容量、小容量下有载调压调容配变有功损耗随负载的变化情况,当两者有功损耗相等时,该负载即为最佳调容临界负载。而有载调压调容配变出厂时给出的理论调容临界负载是根据额定工况下配变大、小容量间的损耗关系得到的^[7,13]。但是有载调压调容配变在运行过程中会进行电压调整,进而影响配变运行损耗,使得理论调容临界负载并不等于最佳调容临界负载^[14-15]。图 2(b) 给出了图 1 所示的餐饮类负荷在不同调容临界负载

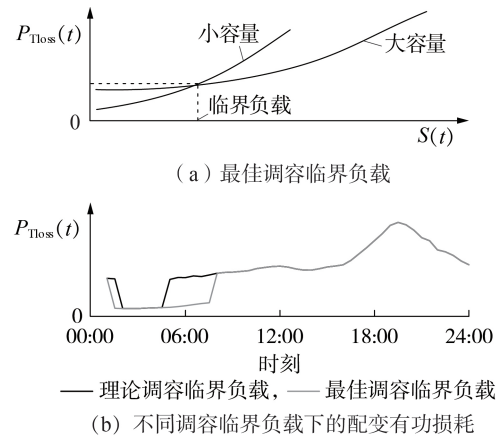


图 2 有载调压调容配变调容临界负载分析

Fig.2 Critical regulating load analysis of on-load voltage and capacity regulating distribution transformer

下的配变有功损耗,由图可见电压调整后,理论调容临界负载下配变全天损耗高于最佳调容临界负载下配变全天损耗。因此,为降低有载调压调容配变损耗,需根据实际运行工况计算最佳调容临界负载。

2 含有载调压调容配变的城市配电网节能降损动态优化方法

2.1 含有载调压调容配变的城市配电网节能降损动态优化模型

基于第1节电能替代下有载调压调容配变损耗分析,本文将调容配变调容临界负载、110 kV变电站主变及配电网中配变的有载调压档位和低压侧无功补偿电容器的无功补偿量作为优化变量,提出一种含有载调压调容配变的城市配电网节能降损动态优化模型,以解决电能替代实施后引起的电压越限和配变电能损耗较大的问题。

(1)目标函数。

为降低城市配电网的电能损耗,将优化周期(本文取为24 h)内配电网中所有线路与所有配变的有功损耗电量之和最少作为目标函数,即:

$$\min F = \sum_{t \in M} \left(\sum_{n \in \Phi} P_{\text{Tloss}}^n(t) \tau + \sum_{m \in \Psi} P_{\text{Lloss}}^m(t) \tau \right) \quad (2)$$

其中, $P_{\text{Tloss}}^n(t)$ 为节点 n 处配变的有功损耗,可由式(1)进行计算,对于常规配变,其有功损耗与式(1)中大容量下有载调压调容配变有功损耗计算方法一致; $P_{\text{Lloss}}^m(t)$ 为线路 m 的有功损耗; Φ 和 Ψ 分别为配电网配变和线路集合; M 为优化周期所有时段集合; τ 为时段间的时间间隔。

(2)静态约束。

配电网安全稳定运行需满足由潮流约束、节点电压约束、有载调压配变调压抽头约束和无功补偿功率约束等构成的常规静态约束以及调容临界负载约束。

$$P_{G,i}(t) - P_{D,i}(t) + P_i(t) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{G,i}(t) + Q_{\text{cr},i}(t) - Q_{D,i}(t) + Q_i(t) = 0 \quad (4)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i(t) \leq U_i^{\max} \quad (5)$$

$$Q_{\text{cr},j}^{\min} \leq Q_{\text{cr},j}(t) \leq Q_{\text{cr},j}^{\max} \quad (6)$$

$$T_{\text{apl}}^{\min} \leq T_{\text{apl}}(t) \leq T_{\text{apl}}^{\max} \quad (7)$$

$$S_{\text{opt},k}^{\min} \leq S_{\text{opt},k}(t) \leq S_{\text{opt},k}^{\max} \quad (8)$$

其中, $P_{G,i}(t)$ 、 $Q_{G,i}(t)$ 、 $P_{D,i}(t)$ 、 $Q_{D,i}(t)$ 、 $P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$ 分别为配电网的节点 i 在时段 t 的发电机有功功率、无功功率、有功负荷、无功负荷、注入有功功率和无功功率; $U_i^{\min}$ 与 $U_i^{\max}$ 分别为节点 i 电压幅值的安全下限和上限; $Q_{\text{cr},j}(t)$ 为第 j 个变压器低压侧无功补偿电容器在时段 t 的无功补偿量; $Q_{\text{cr},j}^{\min}$ 和 $Q_{\text{cr},j}^{\max}$ 分别为补偿无功下限和上限; $T_{\text{apl}}(t)$ 为第 l 个有载调压变压器在时段 t 的分接头档位; $T_{\text{apl}}^{\min}$ 和 $T_{\text{apl}}^{\max}$ 分别为第 l 个有载调压变

压器的档位下限和上限; $S_{\text{opt},k}(t)$ 为第 k 个有载调压调容配变在时段 t 的调容临界负载功率; $S_{\text{opt},k}^{\min}$ 和 $S_{\text{opt},k}^{\max}$ 分别为调容临界负载功率的下限和上限。

(3)动态约束。

在静态约束的基础上,配电网安全稳定运行仍需满足常规动态无功优化的动态约束,即可投切无功补偿电容器全天总动作次数约束、有载调压抽头全天总动作次数约束和相邻时段动作次数约束,以及调容开关全天总动作次数约束。

$$\sum_{t \in M} |C_p(t) - C_p(t-1)| \leq M_p \quad (9)$$

$$|T_l(t) - T_l(t-1)| \leq H_l \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sum_{t \in M} Q_l(t) \leq M_l \\ Q_l(t) = \begin{cases} 1 & T_l(t) \neq T_l(t-1) \\ 0 & T_l(t) = T_l(t-1) \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

$$\sum_{t \in M} |D_k(t) - D_k(t-1)| \leq M_k \quad (12)$$

其中, $C_p(t)$ 为第 p 个电容器开关在时段 t 的状态, $C_p(t) = 1$ 表示开关闭合, $C_p(t) = 0$ 表示开关断开; M_p 为第 p 个电容器开关全天最大允许动作次数; $T_l(t)$ 为第 l 个有载调压变压器抽头在时段 t 的档位值, H_l 为该抽头相邻时段最大调节档位数; $Q_l(t)$ 为第 l 个有载调压变压器调压开关在时段 t 的状态; M_l 为第 l 个有载调压变压器调压开关全天最大允许动作次数; $D_k(t)$ 为第 k 个调容开关在时段 t 的状态, $D_k(t) = 1$ 为大容量, $D_k(t) = 0$ 为小容量; M_k 为第 k 个调容开关全天最大允许动作次数。

2.2 含有载调压调容配变的城市配电网节能降损动态优化步骤

由于本文模型以配变调容临界负载为连续优化变量,变电站主变及配变的有载调压档位和低压侧无功补偿电容器的无功补偿量为整数型离散优化变量,因而其为混合整数非线性规划问题。同时,该模型涉及的调压抽头、调容开关的全天动作次数约束和相邻时段动作次数约束,使得其必须多个时段同时进行优化。为此,本文采用 IPCCD-EA 对该模型进行求解,将离散变量作为一个子种群,连续变量作为另外一个种群,进而将大规模优化问题转为较小范围内的动态优化问题,以提高求解效率。根据短期负荷预测技术^[16-18]、IPCCD-EA 和本文所提模型,得到含有载调压调容配变的城市配电网节能降损动态优化步骤如下。

(1)采用短期负荷预测技术,根据历史负荷数据获取后一天配电网的日负荷曲线。

(2)采用 IPCCD-EA 求解本文所建立的含有载调压调容配变的城市配电网节能降损动态优化

模型:

a. 对于有载调压调容配变,采用本文所提有载调压调容配变潮流计算等值电路,而常规配变的等值电路与大容量下有载调压调容配变的等值电路一致;

b. 采用 IPCCD-EA 对本文优化变量构成的种群进行协同进化搜索;

c. 当 IPCCD-EA 迭代到最大进化代数时,算法收敛,整个求解过程结束。

(3) 获取各有载调压调容配变的调压动作方案、最佳调容临界负载及相应的调容开关动作时段、无功补偿电容器的动作方案,以及全网最小电能损耗。

3 算例分析

3.1 算例的基础数据

某地区 10 kV 配电网有 55 个节点,7 个电能替代项目,接线方式见附录 B 中的图 B1,图中节点 5、13、15、19、46 为城区餐饮类电能替代实施点,节点 54 为电动汽车、电动公交充电站,节点 49 为小型玻璃制造工业的电能替代实施点。据调研,上述 7 个电能替代点配置的有载调压调容配变的参数如附录中的表 B1 所示。

110 kV 变电站主变的调压范围是 $\pm 5\%$,低压侧安装了 10 组无功补偿电容器,每组容量为 50 kvar; 10 kV 有载调压调容配变的调压范围是 $\pm(2 \times 2.5\%)$,低压侧均装设 5 组无功补偿电容器,每组容量为 50 kvar。调压开关全天动作总次数上限为 6 次,相邻时段最大调节档位不超过 1 档,电容器开关全天动作总次数上限为 6 次;调容开关全天动作总次数不超过 2 次。负荷数据来自于该条馈线 2016 年 7 月 26 日全天配电网 SCADA 采集值。380 V 低压系统电压安全范围为标称电压的 90%~107%。IPCCD-EA 的种群数目设为 1,协同进化最大代数为 100 代,协同进化种群规模为 80,遗传算法种群规模为 20,变异概率为 0.15,选择概率为 0.5,遗传代数为 10 代。

3.2 算例结果及分析

根据含有载调压调容配变的配电网节能降损动态优化步骤,获得有载调压调容配变调容临界负载、110 kV 变电站主变及配变的有载调压档位、110 kV 变电站主变及配变低压侧无功补偿电容器的无功补偿量。其中,各配变临界调容负载见表 1。以节点 54 为例分析节能降损优化结果,表 2 给出了全天 24 h 该处有载调压调容配变的运行容量、有载调压档位以及低压侧投入的无功补偿电容器组数,其中有载调容开关全天动作 2 次,有载调压开关全天动作 6 次,电容器开关全天动作 6 次,均满足动态约束要求。

(1) 有载调压调容配变的调压降损效果分析。

表 1 有载调压调容配变临界调容负载

Table 1 Critical regulating loads of on-load voltage and capacity regulating distribution transformers

节点	调容临界负载/ (kV·A)	节点	调容临界负载/ (kV·A)
5	25	46	116
13	82	49	155
15	45	54	190
19	68		

表 2 节点 54 处各设备全天 24 h 动作方案

Table 2 Action plan of each device at node 54 in 24 hours

时段	容量/ (kV·A)	调压 档位	无功补偿 电容器组数	时段	容量/ (kV·A)	调压 档位	无功补偿 电容器组数
1	630	0	2	13	630	+1	4
2	200	-1	1	14	630	+1	4
3	200	-1	1	15	630	+1	4
4	200	-1	1	16	630	+1	4
5	200	-1	2	17	630	+1	4
6	200	-1	2	18	630	+2	4
7	630	-1	3	19	630	+2	4
8	630	0	3	20	630	+2	4
9	630	0	3	21	630	+1	3
10	630	0	3	22	630	+1	3
11	630	0	3	23	630	0	2
12	630	+1	4	24	630	0	2

为分析有载调压调容配变的调压降损效果,图 3 和图 4 分别给出了节点 54 配置常规配变和有载调

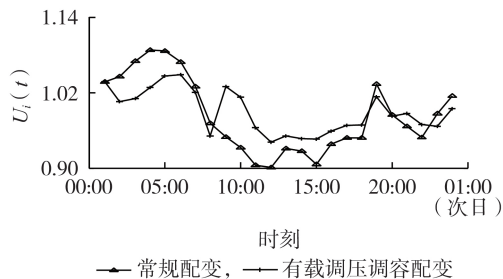


图 3 常规配变和有载调压调容配变电压幅值曲线

Fig.3 Voltage curves of normal and on-load voltage and capacity regulating distribution transformers

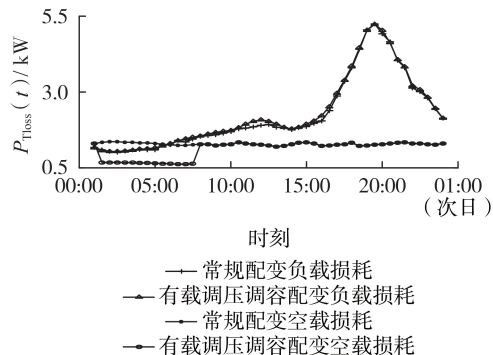


图 4 常规配变和有载调压调容配变全天损耗曲线

Fig.4 All-day loss curves of normal and on-load voltage and capacity regulating distribution transformers

压调容配变时的电压幅值(标么值)曲线和全天损耗曲线。由图3可看出,若在节点54处配置常规配变,则在00:00—06:00的凌晨时段,节点54的负荷较轻,电压幅值逼近1.1 p.u.,超过1.07 p.u.的上限,而在06:00—24:00之间,负荷波动较大,电压幅值最低可接近下限0.9 p.u.;若更换为有载调压调容配变,全天电压幅值均能维持在安全范围内,保证了用户设备的安全可靠运行。

由图4可知,节点54处的有载调压调容配变在02:00时将大容量切换至小容量,然后在07:00将小容量切换至大容量,通过容量切换减少了凌晨时段配变的空载损耗。可见,有载调压调容配变全天电能损耗低于常规配变,运行经济性较高。特别是电能替代实施后,配电网的负荷峰谷差增大,将常规配变改造为有载调压调容配变能够显著减少这种负荷特性带来的高损耗问题,节省大量损耗电能。由此,合理调度有载调压调容配变能够有效解决电能替代后配电网电压越限问题,降低配变损耗。

(2)有载调压调容配变调容临界负载分析

为了分析有载调压调容配变的调容临界负载对变压器电能损耗的影响,图5给出了节点54处有载调压调容配变分别在理论调容临界负载、本文所得调容临界负载下的全天电能损耗曲线。S11型630(200) kV·A有载调压调容配变的理论调容临界负载为113 kV·A,而本文得到的调容临界负载为190 kV·A。由图5可见,本文所得调容临界负载下的配变全天总电能损耗比理论调容临界负载下的电能损耗节省了8.56 kW·h。这是因为有载调压调容配变的理论调容临界负载是根据额定工况下大小容量间的损耗关系得到的,但有载调压调容配变在运行过程中会进行电压调整,使得实际工况不一定等于额定工况,所以理论调容临界负载下的配变电能损耗不一定最小。而本文所提方法具有自适应跟踪负载变化而改变调容临界负载的能力,能够根据配变全天运行工况求解出最佳调容临界负载,在保证配电网电压合格的条件下,进一步降低配变损耗。

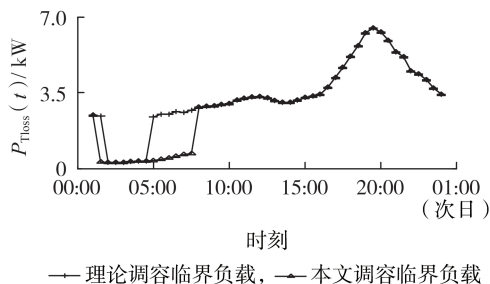


图5 不同调容临界负载下有载调压调容配变全天损耗曲线

Fig.5 All-day loss curves of distribution transformers under different critical capacity regulating loads

(3)含有载调压调容配变的配电网全天损耗分析

将本文方法与配电网常规动态无功优化方法(简称常规方法)、仅含有载调压配变的配电网无功优化方法(简称有载调压方法)的优化效果进行对比。图6给出了3种方法优化下2016年7月26日全天7台有载调压调容配变总损耗曲线、全网所有线路总损耗曲线和全网总损耗曲线对比图。

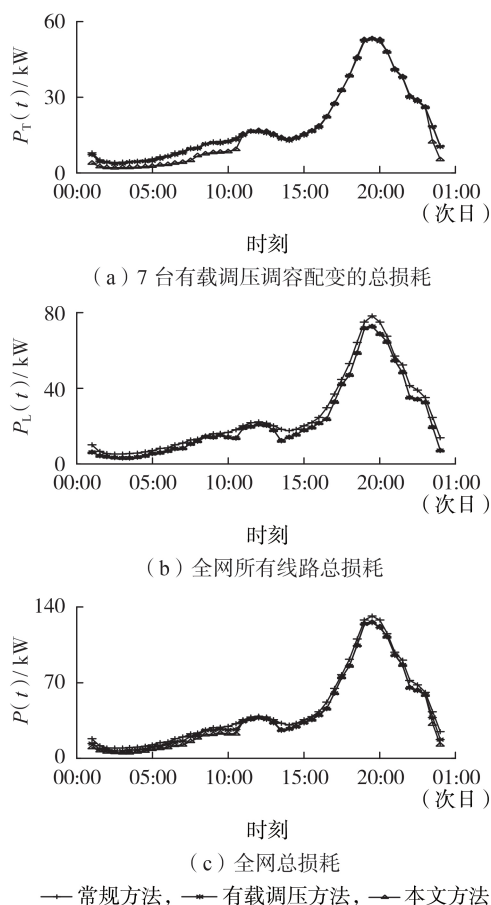


图6 3种方法下配电网损耗曲线对比

Fig.6 Comparison of distribution network loss curves among three methods

由图6(a)可知,常规方法和有载调压方法下的配变全天损耗曲线较接近,而本文方法下配变全天损耗在深夜时间段显著小于常规方法和有载调压方法。因此,根据实际工况进行配变有载调容可有效降低配变损耗。图6(b)中有载调压方法和本文方法得到的全网线路全天损耗曲线较为接近,均低于常规方法下的线路损耗。由此说明,配变有载调压能有效降低网络线路上的无功功率流动,实现配电网电压无功平衡,从而减少全网网损。根据图6(c)可得,本文方法能充分利用有载调压调容配变的容量调节特性和电压调节特性,从变压器降损和线路降损2个角度全面降低配电网全网电能损耗,在保证全网电压合格的同时,有效解决了电能替代下城

市配电网负荷峰谷差显著引起的高损耗问题。

(4)不同负荷特征下的节能降耗结果分析。

选择2016年7月18日至7月24日(夏季气温最高月份)一周的负荷数据,测试本文模型在不同负荷特征下对含有载调压调容配变的配电网节能降耗效果。表3给出了55节点配电网一周的日负荷曲线峰谷差率以及最大负荷数据。图7为常规模型和本文所建模型求解得到的全天全网总损耗柱状图。表4给出了IPCCD-EA和常规进化算法(即采用遗传算法)的求解时间对比结果。

表3 一周的日负荷曲线峰谷差率和最大负荷

Table 3 Peak-valley difference rate and maximum load data of daily load curves in one week

时间	峰谷差率/%	最大负荷/MW	时间	峰谷差率/%	最大负荷/MW
周一	53	7.6	周五	67	8.9
周二	56	8.2	周六	32	5.3
周三	74	9.3	周日	29	4.9
周四	65	8.6			

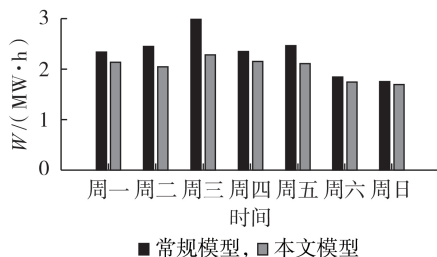


图7 一周内全网总损耗的对比柱状图

Fig.7 Histogram of comparison of total loss of distribution network in one week

表4 IPCCD-EA和常规进化算法求解时间对比

Table 4 Comparison of solving time between IPCCD-EA and conventional EA

时间	求解时间/s		全网总损耗/(MW·h)	
	进化算法	IPCCD-EA	常规模型	本文模型
周一	187.1	78.9	2.3	2.1
周二	201.8	45.9	2.4	2.0
周三	254.2	98.6	2.9	2.2
周四	198.0	102.4	2.3	2.1
周五	167.2	39.3	2.4	2.1
周六	138.4	112.9	1.8	1.7
周日	249.7	145.5	1.7	1.6

由图7和表4的结果可知,在一周内的不同负荷特征下,本文模型给出的优化运行方案都能降低全网总损耗。其中,在峰谷差率较高、最大负荷较高的周三,所减小的损耗最高,而在峰谷差率较低并且最大负荷较低的周日,损耗下降幅度最小。由表4中还可看出,在不同负荷数据下本文模型采用IPCCD-EA的计算耗时均小于常规进化算法。为此,采用IPCCD-EA将本文模型的优化问题转换为多个子优化问题进行求解,能够提高模型的求解效率。本文

模型可适用于不同的日负荷特征,对峰谷差较大的日负荷曲线下的全网降耗效果最为明显。

4 结论

本文根据电能替代下含有载调压调容配变的配电网优化运行需求,建立含有载调压调容配变的配电网节能降耗动态优化模型,采用IPCCD-EA进行求解。算例表明,该模型能够根据全天负荷特征,确定有载调压调容配变的最佳调容临界负载和全天调压调容动作方案,有效降低了全网配变损耗和线路损耗;该模型适用于不同峰谷差和最大负荷下的日负荷曲线,特别在峰谷差较大的日负荷曲线下全网降耗效果最显著;采用IPCCD-EA将本文模型转换为多个子优化问题进行求解,能有效提高模型的求解效率。本文方法解决了电能替代后配电网负荷特征变化引起的电压越限和配变损耗较大的问题,可作为城市电能替代项目的支撑技术,对实现节能减排以及构建环境友好型的智能配电网具有重要意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘斌,岳青,孙毅卫,等. 调容调压变压器现状及发展趋势研究[J]. 变压器,2015,52(5):23-28.
LIU Bin, YUE Qing, SUN Yiwei, et al. Research on present situation and trend of capacity regulating transformer[J]. Transformer, 2015, 52(5): 23-28.
- [2] 王金丽,盛万兴,方恒福,等. 自适应负荷型配电变压器设计[J]. 电力系统自动化,2014,38(18):86-92.
WANG Jinli, SHENG Wanxing, FANG Hengfu, et al. Design of a self-adaptive distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 86-92.
- [3] 陈朋,刘金忠,刘宏,等. 自动调容调压变压器短路阻抗的分析与计算[J]. 变压器,2017,54(4):1-6.
CHEN Peng, LIU Jinzhong, LIU Hong, et al. Analysis and calculation of short-circuit impedance of automatic power and voltage regulating transformer[J]. Transformer, 2017, 54(4): 1-6.
- [4] 赵玉林,牛泽晗,李海凤,等. 具有保护功能的配电变压器无触点有载自动调压分接开关[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):169-175.
ZHAO Yulin, NIU Zehan, LI Haifeng, et al. Contactless OLTC with protective function for power distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 169-175.
- [5] 张德明. 浅析有载调容开关与有载调压开关过渡电阻匹配的差异(3)[J]. 变压器,2016,53(6):46-48.
ZHANG Deming. Analysis of transfer resistance matching difference between on-load capacity regulating and voltage regulating switches: part 3[J]. Transformer, 2016, 53(6): 46-48.
- [6] 周念成,苏宇,王强钢,等. 基于IGBT的配电变压器有载调压开关参数设计及分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):35-42,67.
ZHOU Niancheng, SU Yu, WANG Qianggang, et al. Parameter design and analysis of IGBT-based on-load tap changers for distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 35-42, 67.
- [7] 霍佳贺,赵庆生,王旭平,等. 有载调容变压器最佳容量调节节点

- 分析和选择[J]. 变压器, 2018, 55(8): 38-42.
- HUO Jiahe, ZHAO Qingsheng, WANG Xuping, et al. Analysis and selection of optimal capacity adjustment point of on-load capacity regulating transformer[J]. Transformer, 2018, 55(8): 38-42.
- [8] HINRICHS A, WENZEL J. Study on technical and economic efficiency of amorphous alloy transformer and on-load capacity regulating transformer in distribution network application[C]// China International Conference on Electricity Distribution. Shenzhen, China: IEEE, 2014: 30-34.
- [9] 范闻博, 韩筛根. 有载调容变压器安全经济运行控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 98-102, 107.
- FAN Wenbo, HAN Shaigen. A control strategy for secure and economic operation of on-load capacity regulating transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 98-102, 107.
- [10] 邢海军, 程浩忠, 张逸. 基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1504-1510.
- XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510.
- [11] 文旭, 郭琳, 颜伟, 等. 含电压不可行节点的柔性目标无功优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1676-1685.
- WEN Xu, GUO Lin, YAN Wei, et al. A reactive optimization model with flexible objectives for power systems containing voltage-violated buses[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1676-1685.
- [12] LIANG C H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Parallel optimal reactive power flow based on cooperative co-evolutionary differential evolution and power system decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 249-256.
- [13] 罗伟彬, 刘长江, 龙世熠, 等. S13型有载调容变压器的特性与设计[J]. 变压器, 2015, 52(5): 9-12.
- LUO Weibin, LIU Changjiang, LONG Shiyi, et al. Design and characteristics of S13 on-load capacity regulating transformer[J]. Transformer, 2015, 52(5): 9-12.
- [14] 张友强, 寇凌峰, 盛万兴, 等. 配电变压器运行状态评估的大数据分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 768-773.
- ZHANG Youqiang, KOU Lingfeng, SHENG Wanxing, et al. Big data analytical method for operating state assessment of distribution transformer[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 768-773.
- [15] 凌健. 非晶配变与调容变的节能分析[J]. 变压器, 2018, 55(3): 27-30.
- LING Jian. Analysis on technical performance of amorphous core distribution transformer[J]. Transformer, 2018, 55(3): 27-30.
- [16] QUILUMBA F L, LEE W J, HUANG H, et al. Using smart meter data to improve the accuracy of intraday load forecasting considering customer behavior similarities[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 911-918.
- [17] 孔祥玉, 郑锋, 鄂志君, 等. 基于深度信念网络的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 133-139.
- KONG Xiangyu, ZHENG Feng, E Zhijun, et al. Short-term load forecasting based on deep belief network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 133-139.
- [18] 祖向荣, 田敏, 白焰. 基于模糊聚类与函数小波核回归的短期负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 134-140, 165.
- ZU Xiangrong, TIAN Min, BAI Yan. Short-term load forecasting based on fuzzy clustering and functional wavelet-kernel regression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 134-140, 165.

作者简介:



梁国开

梁国开(1989—),男,广东罗定人,工程师,硕士,主要研究方向为配网不停电作业、电力系统建模等(E-mail: 1037424860@qq.com);

方健(1985—),男,湖北荆州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为配网运行管理、配网技术监督、配网新技术推广等(E-mail: fjenglish@163.com);

王志军(1967—),男,广东广州人,工程师,主要研究方向为配网不停电作业、高压试验等(E-mail: wangzj@guangzhou.csg.cn)。

(编辑 任思思)

Dynamic optimization model of energy-saving and loss reduction for urban distribution networks with on-load voltage and capacity regulating distribution transformers

LIANG Guokai, FANG Jian, WANG Zhijun, TAN Yu, CUI Yiping, YIN Kuang, LUO Simin, JIANG Jian
(China Southern Power Grid Guangzhou Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The load characteristics of urban distribution network under electric energy replacement are analyzed, and the active loss calculation formula is deduced according to the power flow calculation equivalent circuit of on-load voltage and capacity regulating distribution transformers. Then taking the minimum power loss of the whole network as the objective function, a dynamic optimization model of energy-saving and loss reduction for urban distribution networks with on-load voltage and capacity regulating distribution transformers is proposed, which is solved by the parallel cooperative co-evolutionary differential evolution algorithm to obtain the action schemes of equipment such as on-load voltage and capacity regulating distribution transformers. The effectiveness of the proposed model is verified by simulation analysis of a practical 55-bus distribution network.

Key words: distribution network; on-load voltage and capacity regulating distribution transformer; energy-saving and loss reduction; dynamic optimization

附录 A

为了简化含有载调压调容配变的配电网潮流计算，图 A1 给出了有载调压调容配变的 π 型等值电路。图中， k 为变压器变比，由电网电压与电压允许偏差确定； G_T 和 B_T 分别为变压器激磁电导和激磁电纳； R_T 和 X_T 分别为变压器的短路电阻和短路电抗。当配变负载功率大于等于配变调容临界负载功率时，有载调压调容配变工作在大容量状态，参数 G_T 、 B_T 、 R_T 和 X_T 由大容量下的配变基础参数决定；当配变负载功率小于配变调容临界负载功率时，有载调压调容配变工作在小容量状态，参数 G_T 、 B_T 、 R_T 和 X_T 由小容量下的配变基础参数决定，即：

$$\begin{cases} R_T = \frac{P_{kH} U_N^2}{S_{NH}^2}, X_T = \frac{U_{kH} \% U_N^2}{S_{NH}} \\ G_T = \frac{P_{0H}}{U_N^2}, B_T = \frac{I_{0H} \% S_{NH}}{U_N^2} \end{cases} \quad S(t) \geq S_{opt} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} R_T = \frac{P_{kL} U_N^2}{S_{NL}^2}, X_T = \frac{U_{kL} \% U_N^2}{S_{NL}} \\ G_T = \frac{P_{0L}}{U_N^2}, B_T = \frac{I_{0L} \% S_{NL}}{U_N^2} \end{cases} \quad S(t) < S_{opt} \quad (A2)$$

其中， $S(t)$ 为 t 时段配变的负载功率； S_{opt} 为配变调容临界负载功率； S_{NH} 、 S_{NL} 分别为有载调压调容配变的大额定容量和小额定容量； P_{0H} 、 P_{0L} 分别为有载调压调容配变大、小容量下的空载损耗； P_{kH} 、 P_{kL} 分别为有载调压调容配变大、小容量下的短路损耗； $U_{kH} \%$ 、 $U_{kL} \%$ 分别为有载调压调容配变大、小容量下的短路电压百分值； $I_{0H} \%$ 、 $I_{0L} \%$ 分别为有载调压调容配变大、小容量下的空载电流百分值； U_N 为变压器低压侧额定电压。

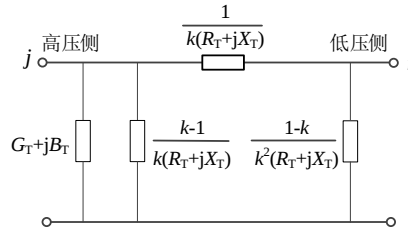


图 A1 有载调压调容配变潮流计算等值电路

Fig. A1 Equivalent calculation circuit of on-load voltage and capacity regulating distribution transformers

附录 B

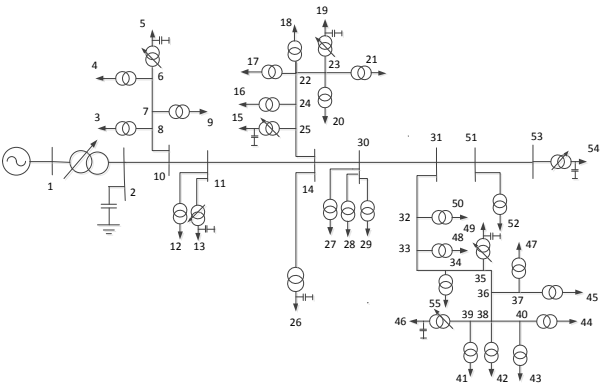


图 B1 某地区实际 10 kV 55 节点城市配电网接线图
Fig.B1 Wiring diagram of 10kV 55-bus urban distribution network

表 B1 有载调压调容配变参数
Table B1 Parameters of on-load voltage and capacity regulating distribution transformer

节点	容量/(kV·A)	调容临界负载下限/(kV·A)	调容临界负载上限/(kV·A)	空载电流/%	空载损耗/W	短路电压/%	短路损耗/W
5	200 (63)	0	100	1.5 (0.7)	340 (150)	4.0	2730 (1040)
15	315 (100)	5	120	1.4 (0.7)	480 (200)	4.0	3830 (1500)
13	400 (125)	10	130	1.3 (0.6)	570 (240)	4.0	4520 (1800)
19							
46	500 (160)	30	150	1.2 (0.6)	680 (280)	4.0	5410 (2200)
49	630 (200)	50	200	1.1 (0.5)	810 (340)	4.5	6200 (2600)
54							

注：括号中的数据数据是否对应小容量下的数据。