

基于拟态物理学优化算法的微电网功率优化

詹 昕¹, 向铁元¹, 曾 爽¹, 熊 虎¹, 徐庆中²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 江苏省扬州供电公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: 考虑天气等因素对微电网有功功率平衡的影响, 计及电力市场环境下的需求侧响应, 将微电网负荷分为高赔偿可中断负荷(ILH)与低赔偿可中断负荷(ILL)。在保证微电网功率平衡以及满足潮流、电压、频率偏移和开关损耗等约束的前提下, 以微电网总收益最大为目标函数, 建立考虑切负荷操作的微电网功率优化数学模型, 并利用拟态物理学优化(APO)算法进行求解。微电网 14 节点系统的仿真结果验证了所提算法的有效性。

关键词: 微电网; 功率控制; 优化; 切负荷; 拟态物理学优化算法; 收益

中图分类号: TM 61; TM 731

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.008

0 引言

由于微电网^[1-2]中的电源主要是光伏电池、风机等, 这些分布式电源本身的频率调节能力不高, 而且这些电源受天气变化影响大, 容易造成微电网严重的功率缺额。因此, 为保证微电网功率平衡, 切负荷操作是切实有效的措施^[3]。

在市场环境下, 作为独立的经济实体, 不论是电力公司、电力采办公司还是电网公司, 所追求的将是自身的经济利益, 微电网作为一个新兴的前沿电网概念, 对其进行以经济性为目标的切负荷探究是有积极意义的。

本文介绍了微电网的功率优化关键问题及主要特点, 随后分析了在市场环境下, 建立考虑切负荷操作下微电网功率优化的数学模型, 并给出了一种基于拟态物理学的求解算法。论文最后对上述算法进行测试和比较, 结果证明了方法的有效性。

1 微电网功率优化问题概述

1.1 微电网结构

微电网的典型结构如图 1 所示, 图中分隔器为断路器。图中包括 3 条馈线及 1 条母线。馈线通过主分隔装置与配电系统相连, 可实现孤岛与并网运行模式间的平滑切换, 该开关点即 PCC。正常运行时, PCC 开关闭合, 微电网与大电网联网运行, 2 个系统的功率互补余缺; 当大电网出现故障时, PCC 开关断开, 微电网切换至孤岛运行方式, 此时微电网仍然能够保证微电网内负荷正常供电。

图 1 中各支路都有微电源, 一些接在热载用户附近, 为当地提供热源。微电源主要包括燃料电池、可再生发电如风力发电和光伏发电、基于微型燃气轮机和逆变器的内燃机发电等。微电网可灵活地将这些分布式电源接入或断开, 即分布式电源具有“即插即用”的能力。微电网中配置能量管理系统可实现

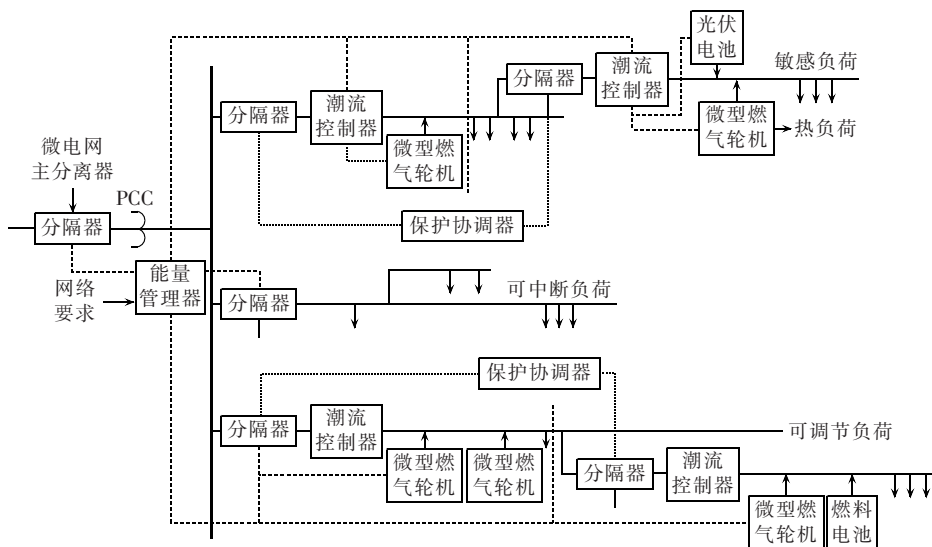


图 1 微电网基本结构图

Fig.1 Basic structure of microgrid

对整个微电网的综合分析,进而对微电源进行就地控制。当负荷变化时,能量管理系统根据本地频率和电压调节潮流,使当地微电源与负载保持功率平衡^[4]。

1.2 微电网功率优化研究现状

文献[5]提出微电网主从型控制策略。主从控制法主要用于孤岛运行时的微电网,当孤岛运行时微电网内的各个微电源只需控制功率流的输出以保证微电网内部功率平衡。文献[6]提出微电网对等控制策略(peer-to-peer operation),即各微电源之间是“平等的”,不存在从属关系。所有的微电源以预先设定的控制模式参与有功与无功的调节,从而维持系统电压、频率的稳定。文献[7]提出针对电力系统功率平衡的自动切负荷方法。目前自动切负荷控制针对暂态稳定研究较多,但是尚缺乏系统的理论研究、对电力系统频率动态特性深刻认识基础上的频率预测控制实时算法,及在切负荷控制时综合考虑电网过负荷以及电网电压水平的研究。文献[8]指出微电网正常运行时用主从控制策略结合多代理技术,更适合于构建一个稳定高效、精确可控的微电网控制系统。而当微电网有严重功率缺额时,采用自动切负荷方法,能够有效解决微电网功率平衡问题。

1.3 切负荷操作的功率优化控制

在市场环境下,针对切负荷操作,从电网公司的角度而言,如果维持供电连续性的支出大于切负荷的支出(电网公司终止对负荷的供电必须在经济上对用户补偿),则电网公司乐于采取切负荷措施;从电力用户的角度而言,如果电网公司向其提供的经济补偿高于其维持连续用电所带来的经济利益,则电力用户也将乐于接受切负荷的措施^[9]。在这种可能性存在的前提之下,切负荷操作对双方在经济上将形成双赢局面。实际中这种可能性的确是存在的。

以电网运行的经济性为目标的切负荷操作,就是当电网容量出现缺额时,电网公司对可中断负荷(IL)进行选择性的切除,这种选择性就体现在保证电网功率平衡的同时电网公司切负荷费用最小即电网总收益最大。IL有低赔偿可中断负荷(ILL)和高赔偿可中断负荷(ILH)2种:ILL是通过约定的低电价来获得对负荷的中断权的,即若发生过负荷,微电网对ILL进行切负荷,不再对其作出赔偿(正常供电时的折扣电价已进行等价赔偿);而ILH以正常电价进行供电,若发生过负荷,对其进行切负荷时要对ILH高价赔偿。因此对于微电网而言,发生过负荷则首先对ILL进行切负荷操作,若微电网功率缺额大于ILL总负荷量,则再考虑对ILH切负荷。通过建立考虑切负荷操作的微电网功率优化控制数学模型,采用适当的算法进行解决,从而能够获得对电网公司经济性最优的功率优化配置方案(即切负荷方案)^[10-11]。

2 微电网功率优化建模

微电网的运行方式有2种,不同运行方式下微电网的功率流向不同,并网运行时微电网能够从大电网获得功率,而孤岛运行时微电网内功率需要自给自足。论文对模型数据进行离散化处理。

优化目标:实施切负荷方案时,在保证微电网功率平衡的前提下,使微电网的总收益最大。根据不同IL类型的定义,可知这个总收益可正可负,其大小表征某个切负荷方案的经济性。

决策变量:开关状态 X_i 决定第 i 个IL的开关状态,它直接影响切负荷量,决定切负荷的具体方案。

目标函数:对任意IL,若其接入电网则按合同电价收取电费,若其被切除则按约定进行赔偿。优化模型考虑某个时间断面上微电网中所有IL的接入状态,可获得微电网单位时间内的总收益即目标函数为:

$$\begin{aligned} \max C(X_i) \\ C(X_i) = \sum_{i=1}^L [(\alpha_i p_0 \bar{X}_i - \beta_i p_0 X_i) P_i] \end{aligned} \quad (1)$$

其中, p_0 是正常售电电价; α_i 是不同IL的电价系数,ILL情况下 $\alpha_i \leq 1$,ILH情况下 $\alpha_i \geq 1$; X_i 是第 i 个IL的开断状态,1表示断开,0表示未断开, $\bar{X}_i$ 表示取反; β_i 是赔偿系数,ILL情况下 $\beta_i = 0$,ILH情况下 $\beta_i > 0$; P_i 是第 i 个IL的有功功率(MW),是一个固定值。 $a_i = \alpha_i p_0$ 是第 i 个IL签订的合同电价(元/MW); $b_i = \beta_i p_0$ 是第 i 个IL的单位赔偿费用(元/MW)。

式(1)表示各个负荷在各自的开断状态下对于电网的总收益:若某负荷未断开,则收益为 $a_i P_i (X_i = 0, \bar{X}_i = 1)$;若某负荷断开,则收益为 $-b_i P_i (X_i = 1, \bar{X}_i = 0)$ 。

切负荷操作会产生开关损耗,而且大量负荷同时中断会对电网的稳定性产生不利影响,因此需要对负荷开关的中断总数进行约束,不能超过某一限值(这个限值是根据电网的具体情况给出)^[12]。

$$\sum_{i=1}^L X_i \leq N_1 \quad (2)$$

实际情况中电力系统的负荷是时刻变化的,不能随时维持功率平衡,故将电力系统的潮流、频率和电压都需限制在一定的范围之内,分别见式(3)~(6)。

$$P_{G,i} - P_{L,i} - U_i \sum U_j \sin(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{G,i} - Q_{L,i} - U_i \sum U_j \cos(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (4)$$

$$\Delta \omega_i = \left| \frac{\sum_{i=1}^L P_i X_i - \Delta P}{K} \right| \leq 0.2 \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (6)$$

其中, ΔP 是需要切除的负荷量(即储能装置已经达到极限调节能力后的微电网有功缺额; K 是微电网

负荷单位频率的有功变化量,取值由具体的微电网参数决定。

在大多数的非线性优化问题中,通常将约束条件通过惩罚因子加入到目标函数中,故上述问题可归纳为如下数学模型:

$$\max F = \max \left(\sum_{i=1}^L (\alpha_i p_0 \bar{X}_i - \beta_i p_0 X_i) \right) P_i - \lambda_{U_i} \sum_{i=1}^L (U_i - U_i^{\lim})^2 - \lambda_{\omega_i} \sum_{i=1}^L (\omega_i - \omega_i^{\lim})^2 \quad (7)$$

其中, λ_{U_i} 和 λ_{ω_i} 为惩罚因子,在计算时其数值取足够大。 $U_i^{\lim}$ 和 $\omega_i^{\lim}$ 定义如下:

$$U_i^{\lim} = \begin{cases} U_i^{\min} & U_i \leq U_i^{\min} \\ U_i & U_i^{\min} < U_i < U_i^{\max} \\ U_i^{\max} & U_i \geq U_i^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

$$\omega_i^{\lim} = \begin{cases} \omega_i^{\min} & \omega_i \leq \omega_i^{\min} \\ \omega_i & \omega_i^{\min} < \omega_i < \omega_i^{\max} \\ \omega_i^{\max} & \omega_i \geq \omega_i^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

3 优化算法

采用拟态物理学优化(APO)算法对所提微电网功率优化数学模型进行优化计算^[13-14]。

APO 算法是受牛顿第二定律启发而提出的一种优化算法。APO 算法的思路为:设群体规模为 n ,则第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 个个体的质量表示为 m_i ,第 k 维的速度表示为 $v_{i,k}$,第 k 维的位置表示为 $x_{i,k}$,个体第 k 维上受到第 j 个($i \neq j$)个体的虚拟力为 $F_{ij,k}$,受到群体中所有其他个体总的作用力为 $F_{i,k}$ 。其中 m_i 、 $F_{ij,k}$ 、 $F_{i,k}$ 由式(10)–(12)决定:

$$m_i = e^{\frac{f(x_{i_{\max}}) - f(x_i)}{f(x_{i_{\max}}) - f(x_{i_{\min}})}} \quad (10)$$

$$F_{ij,k} = \begin{cases} G m_i m_j (x_{j,k} - x_{i,k}) & f(x_i) > f(x_j) \\ -G m_i m_j (x_{j,k} - x_{i,k}) & f(x_i) \leq f(x_j) \end{cases} \quad \forall i \neq j, i \neq \text{best} \quad (11)$$

$$F_{i,k} = \sum_{j=1}^n F_{ij,k} \quad \forall i \neq \text{best}, i \neq j \quad (12)$$

其中, G 是引力因子,在单目标优化问题中 G 通常取 10; $x_{i_{\text{best}}}$ 、 $x_{i_{\text{worst}}}$ 分别为最优、最差适应值的位置。

将式(10)–(12)代入下式,以最终更新个体 i 的速度和位置:

$$v_{i,k}(t+1) = w v_{i,k}(t) + \lambda F_{i,k} / m_i \quad (13)$$

$$x_{i,k}(t+1) = x_{i,k}(t) + v_{i,k}(t) \quad (14)$$

其中, w 是惯性权重,取值在 $(0,1)$ 之间; λ 是一个在 $(0,1)$ 间均匀分布的随机数。个体运动时的速度、空间受到限制: $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$, $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$ 。

该算法中每个个体即代表微电网中开关 X_i 的状态量取值。每个个体根据自己的惯性(由其质量 m_i 和速度 v_i 决定)及其他个体的合力(由 F_{ij} 决定)作

用来调整自己的运动 $v_{i,k}$ 和位置 $x_{i,k}$ 。每个好的个体吸引比它差的个体,而差的个体排斥比它好的个体。每个个体通过全局最好、最差适应值和自身适应值不断更新质量。其中,个体的好坏由优化问题的适应值(即目标函数和约束条件)来评价。随着质量的变化,个体所受到的力也在改变,从而最终更新个体的速度和位置,整个群体所经历的最好位置便是目前找到的全局最优解,从而得到微电网切负荷操作最经济的方案,即此时式(7)取最大值。

APO 算法全局搜索能力较好,与传统遗传算法相比,其具有稳定和快速的收敛性及较好的鲁棒性。

4 算例分析

以微电网 14 节点测试系统为基础构造如图 2 所示仿真系统,图中 PV、MT、FC、WT、BS 分别表示光伏电池、微型燃气轮机、燃料电池、风力发电及储能。

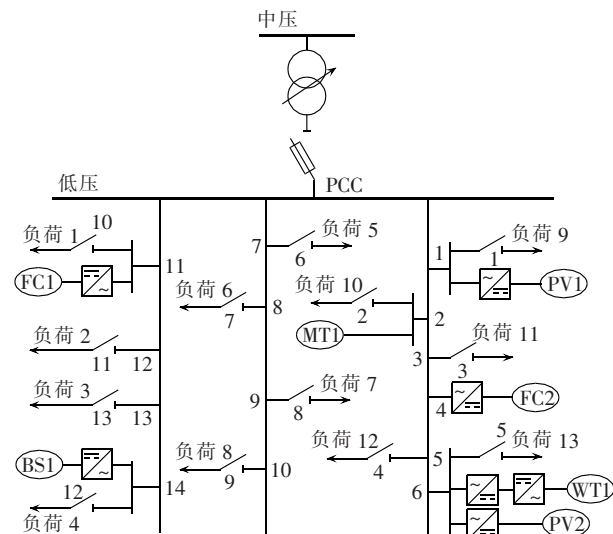


图 2 微电网测试系统

Fig.2 Test system of microgrid

设天气发生巨变,微电网中 PV、WT 有功输出急剧减少,导致微电网出现严重有功缺额。微电源出力均已达到极限时,微电网的有功缺额为 $\Delta P=2.4$ MW。BS1 最大充放电功率为 0.5 MW^[15]。

算例中,电网公司与用户间进行事前博弈,为换取负荷的可中断权而和用户签订折扣电价合同,而现实运行中博弈(或双方多次往返选择)不具有操作性,很难实施。故进行算例分析时暂不考虑过程博弈。

微电网 IL 共有 13 个。因为微电网负荷分为一般负荷、可调负荷以及敏感负荷。在微电网发生功率缺额需要进行切负荷操作时,优先考虑切一般负荷,其赔偿系数较低,其次考虑可调负荷,在无法满足频率和电压等约束条件时,才切敏感负荷,故敏感负荷赔偿系数最高。表 1—3 分别列出了测试网络中

表 1 一般负荷数据
Tab.1 Data of common loads

开关号	类型号	负荷/MW	α_i	β_i
1	0	0.10	0.92	0
9	0	0.48	0.73	0
12	0	0.17	0.85	0
13	0	0.25	0.78	0

表 2 可调负荷数据
Tab.2 Data of adjustable loads

开关号	类型号	负荷/MW	α_i	β_i
3	1	0.28	1	2.15
4	1	0.08	1	2.32
5	1	0.06	1	2.36
6	1	0.35	1	2.00
8	1	0.51	1	2.20
10	1	0.10	1	2.42

表 3 敏感负荷数据
Tab.3 Data of sensitive loads

开关号	类型号	负荷/MW	α_i	β_i
2	2	0.20	1	2.55
7	2	0.14	1	2.80
11	2	0.11	1	2.61

13 个 IL 的电价系数与赔偿系数。其中 1、9、12、13 为 ILL,其余的 2、3、4、5、6、7、8、10、11 均归算为 ILH^[16]。
售电电价 p_0 取为 400 元/(MW·h)。开关损耗限值 $N_1=9$ 。根据算例给出的有功缺额,在储能设备提供不同的补给功率下,给出相对应的开关组合状态,由优化程序运行出的结果如表 4 所示。

表 4 IL 优化结果
Tab.4 Results of IL optimization

BS1 出力/MW	有功缺额/MW	中断开关号	中断总 IL/MW	中断总收益/元
0.5	1.9	1,3,5,6,9,12,13	1.69	-121.44
0.3	2.1	1,3,4,5,6,9,10,12,13	1.87	-364.48
0	2.4	1,2,6,8,9,10,12,13	2.16	-761.60

在总有功缺额 $\Delta P=2.4$ MW 不变的情况下,随着超级电容器出力的减少,在 ILL(开关号 1、9、12、13)全部切除后($P_{\text{ILL}}=1$ MW)仍然不能弥补微电网的有功缺额,选择中断 ILH。
通过应用遗传算法(GA)对算例进行计算比较,结果表明,本文所运用的 APO 算法收敛性明显优于 GA,结果如图 3—5 所示。

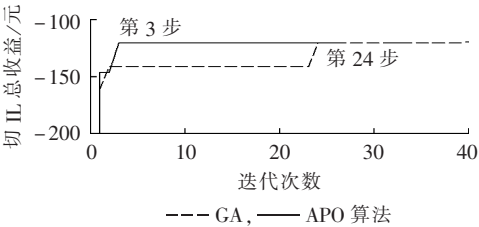


图 3 BS1 出力 0.5 MW 时 GA 和 APO 算法收敛性比较
Fig.3 Comparison of convergence between GA and APO algorithm when BS1 output is 0.5 MW

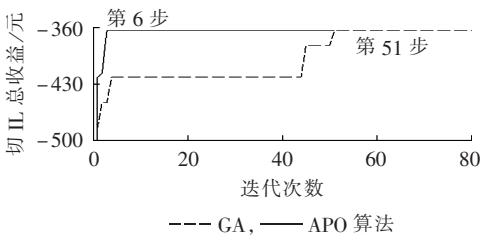


图 4 BS1 出力 0.3 MW 时 GA 和 APO 算法收敛性比较
Fig.4 Comparison of convergence between GA and APO algorithm when BS1 output is 0.3 MW

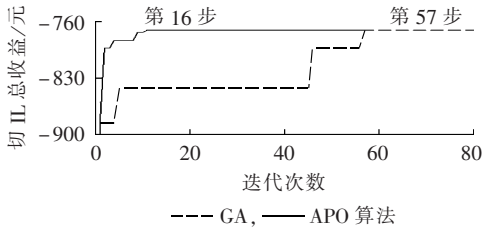


图 5 BS1 出力 0 MW 时 GA 和 APO 算法收敛性比较
Fig.5 Comparison of convergence between GA and APO algorithm when BS1 output is 0 MW

5 结论

通过优化结果我们发现,随着储能设备出力的减少,需要中断的 IL 有功总额增多,需要支付的费用也逐渐增多。中断 IL 策略的效益有以下 3 个方面。
a. 对于整个系统,当出现严重的有功缺额时,通过中断 IL,可以实现电网系统有功重新趋于平衡,频率回到安全范围之内,保持了电网的稳定和安全运行。
b. 对于微电网,通过所给策略的优化计算,使得在出现严重缺电的状况下,能保证用最少的成本实现供需平衡。电力市场环境下,利益是电网追求的最终目标,因此就要求应对突发状况的控制策略具有最优的经济效益。通过优化结果发现,实施论文所给的中断 IL 策略可将电网的缺电损失降到最低。
c. 对于用户,用户含有对电能可靠性要求不一样的负荷,因此根据自身的需要与电网签订不同的合同,一旦发生断电,电网将根据合同作出相应赔偿。用户在失电过程中,必然会有损失,所以赔偿费用一般大于损失费,用户才比较乐意接受断电。所以,从用户的利益来看,用户获得了高于不断电时的利益。

参考文献:

[1] 盛鸥,孔力,齐智平. 新型电网-微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器,2007,35(12):75-81.
SHENG Kun,KONG Li,QI Zhiping. A survey on research of microgrid-a new power system[J]. Relay,2007,35(12):75-81.
[2] 鞠平,蔡昌春,曹相芹. 基于物理背景的微网总体模型[J]. 电力自动化设备,2010,30(3):7-11.
JU Ping,CAI Changchun,CAO Xiangqin. General microgrid model based on physical background[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(3):7-11.
[3] 国海,苏建徽,张国荣. 微电网技术研究现状[J]. 四川电力技术,

- 2009,32(2):1-6.
- GUO Hai,SU Jianhui,ZHANG Guorong. The technology research condition of micro-grid[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009,32(2):1-6.
- [4] THACKER T. Control of power conversion system for the international islanding of distributed generation units[D]. Blacksburg, Virginia,USA:Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [5] 王鹤,李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
- WANG He,LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):19-23.
- [6] 王守相,李晓静. 含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法[J]. 电力系统自动化,2007,31(10):61-65.
- WANG Shouxiang,LI Xiaojing. Multi-agent approach for service restoration of distribution system containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(10):61-65.
- [7] 章健,艾芊,王新刚. 多代理系统在微电网中的应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(24):80-82.
- ZHANG Jian,AI Qian,WANG Xingang. Application of multi-agent system in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(24):80-82.
- [8] 鲁宗相,王彩霞,闵勇. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
- LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(19):100-107.
- [9] 王建学,王锡凡,张显,等. 电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理(一)可中断负荷成本效益分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(5):15-19.
- WANG Jianxue,WANG Xifan,ZHANG Xian,et al. Interruptible load management in power market and interim system part 1 cost-benefit analysis of interruptible load[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(5):15-19.
- [10] 张国新,王蓓蓓. 引入需求响应的电力市场运行研究及对我国电力市场改革的思考[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):28-34.
- ZHANG Guoxin,WANG Beibei. Study of power market operation with demand response and consideration of China's power market reform[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(10):28-34.
- [11] MAJUMDAR S,CHATTOPADHYAY D,PAIKH J. Interruptible load management using optimal power flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems,1996,11(2):715-719.
- [12] 罗运虎,邢丽冬,王勤,等. 可中断负荷最优报价策略研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):36-40.
- LUO Yunhu,XING Lidong,WANG Qin,et al. Optimal bidding strategy of interruptible load[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(8):36-40.
- [13] 谭论农,张保会. 市场环境下的负荷备用容量[J]. 电力自动化设备,2003,23(6):10-12.
- TAN Lunnong,ZHANG Baohui. Reserve capacity for load variation in power market environment[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(6):10-12.
- [14] 王艳,曾建潮. 一种基于拟态物理学优化的多目标优化算法[J]. 控制与决策,2010,25(7):1040-1044.
- WANG Yan,ZENG Jianchao. Multi-objective optimization algorithm based on artificial physics optimization[J]. Control and Decision,2010,25(7):1040-1044.
- [15] 王鑫,郭佳欢,谢清华. 超级电容器在微电网中的应用[J]. 2009,25(6):18-22.
- WANG Xin,GUO Jiahuan,XIE Qinghua. Applications of super capacitor in microgrid[J]. Power System and Clean Energy,2009,25(6):18-22.
- [16] 沈阳武,彭晓涛,杨军,等. 超级电容器储能系统的功率实时控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):28-33.
- SHEN Yangwu,PENG Xiaotao,YANG Jun,et al. Real-time power control of ultracapacitor energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):28-33.

作者简介:

詹 昕(1988-),男,江苏扬州人,博士研究生,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:zhanxinstar@163.com);

向铁元(1953-),男,湖北仙桃人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析、仿真计算和稳定运行与控制;

曾 爽(1985-),男,湖北黄石人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;

熊 虎(1980-),男,湖北咸宁人,博士研究生,研究方向为电力系统规划;

徐庆中(1962-),男,江苏扬州人,高级工程师,从事电力系统运行、继电保护等工作。

Microgrid power optimization based on artificial physics optimization algorithm

ZHAN Xin¹,XIANG Tiejuan¹,ZENG Shuang¹,XIONG Hu¹,XU Qingzhong²

(1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;

2. Yangzhou Electric Power Company of Jiangsu Province,Yangzhou 225009,China)

Abstract: The microgrid loads are classified into the interruptible load of high compensation and the interruptible loads of low compensation,which considers the impact of weather factor on the active power balance of microgrid and the demand-side response under the environment of electricity market. With the maximum microgrid total revenue as its objective and subjected to the constraints of microgrid power balance,power flow,voltage,frequency deviation and switch loss,a power optimization model based on load shedding is established for microgrid,which is solved by the artificial physics optimization algorithm. The simulative result of a 14-bus microgrid verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: microgrid; power control; optimization; electric load shedding; artificial physics optimization algorithm; revenues