

DOI: 10.7667/PSPC161947

温控负荷群 Fokker-Planck 方程聚合模型的 数值拉普拉斯反变换求解方法

刘萌¹, 梁雯², 张晔³, 程定一³, 高文龙⁴, 韩延峰⁵, 井雨刚¹

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 2. 国网山东省电力公司烟台供电公司, 山东 烟台 264001; 3. 山东大学, 山东 济南 250061; 4. 山东送变电工程公司, 山东 济南 250022; 5. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

摘要: 作为典型的具有热存储特性负荷, 温控负荷具有参与电力系统有功调度与控制的潜能。为了便于分析和控制, 提出了一种温控负荷群 Fokker-Planck 方程聚合模型的数值拉普拉斯反变换求解方法。分别介绍了温控负荷的单个个体的物理模型和 Fokker-Planck 方程聚合模型, 在此基础上, 采用数值拉普拉斯反变换法对 Fokker-Planck 方程聚合模型进行求解。通过算例仿真验证了温控负荷群 Fokker-Planck 方程聚合模型的数值拉普拉斯反变换求解的有效性。对温控负荷进行分散式控制, 根据频率调整设定温度, 改变其功率需求。把用数值拉普拉斯反变换求解后的温控负荷聚合模型结合到电力系统频率控制模型中, 进行频率响应分析。通过对 3 机 9 节点系统仿真, 验证了该模型结合到电力系统频率仿真模型中控制效果的有效性。

关键词: 温控负荷; Fokker-Planck 方程; 负荷群聚合模型; 数值拉普拉斯反变换; 频率控制

Numerical inverse Laplace transform solving method of thermostatically controlled load group's Fokker-Planck equation aggregation model

LIU Meng¹, LIANG Wen², ZHANG Ye³, CHENG Dingyi³, GAO Wenlong⁴, HAN Yanfeng⁵, JING Yugang¹

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China; 2. Yantai Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Yantai 264001, China; 3. Shandong University, Jinan 250061, China; 4. Shandong Electric Power T & T Engineering Company, Jinan 250022, China; 5. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: As the typical load with thermal energy storage property, thermostatically controlled loads possess the potential to actively participate in active power dispatch and control for power system. In order to facilitate the analysis and control, a numerical inverse Laplace transform solving method of thermostatically controlled load group's Fokker-Planck equation aggregation model is proposed. The single model and Fokker-Planck equation aggregation model for thermostatically controlled loads are introduced respectively, and the aggregation model's numerical inverse Laplace transform solving method is proposed. Simulation results verify the effectiveness of the proposed numerical inverse Laplace transform solving method. A decentralized control scheme is applied to controllable load, which adjusts its setting temperature to regulate its power demand according to frequency measurement signal. The numerical inverse Laplace transform solving model is integrated into frequency control model of 3 machine 9 bus power system, verifying the effectiveness of the frequency control effects.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507094).

Key words: thermostatically controlled load; Fokker-Planck equation; load group's aggregation model; numerical inverse Laplace transform; frequency control

0 引言

实时保持发电功率和电力负荷之间的平衡关系

是电力系统运行的基本要求之一^[1-5]。传统上采用发电跟踪负荷的方式满足功率平衡, 负荷为被动的物理终端, 只有控制发电机组出力难以维持功率平衡或需要付出太高的代价时, 才考虑切负荷措施(如低频减载、低压减载和可中断负荷控制等)^[6-10]。传统

切负荷方法受通信和信息测量系统的限制,一般到变电站馈线级别,不区分所切除馈线上负荷的种类和重要性,停电后的社会负面影响较大,越来越难以满足电力用户对供电服务质量的要求^[11-12]。

近些年,能源短缺和环境污染之间日益突出的矛盾使电力系统发电构成发生变化,出力具有随机性和波动性的间歇式可再生能源发电(如风力发电和太阳能发电等)机组、运行在负荷曲线基底部分的核电机组以及大容量、超临界的燃煤机组在系统中的占比不断增加,发电侧灵活调节出力的能力逐渐减弱。与此同时,高速、双向、实时和集成的通信网络像电网一样深入用户,电网和通信网络联系越发紧密,用户与电网之间的通信水平得到很大提升,通信成本得到有效降低,负荷的可控性增强,选择特定类型的负荷进行主动控制成为可能。因此,传统的调度控制方式应该作出改变,源-网-荷互动运行与控制成为发展方向^[13]。电力系统中存在大量具有能量(热能、化学能和电能等)存储特性的负荷,如空调、冰箱、热水器、热泵、电解铝和电动汽车等,短时间控制不会对用户用电产生明显的负面作用,具有主动参与电力系统调度控制的潜能^[14-18],本文以具有热存储特性的温控负荷作为可控负荷的例子进行研究。

建立精确且实用的负荷群模型是研究温控负荷参与电力系统调度与控制的基础。蒙特卡洛模拟法是目前文献中分析温控负荷群运行特性时普遍采用的方法,该方法精确度较高,但一次抽样结果无法反映负荷群的概率运行状态,多次抽样求得数学期望,能够得到负荷群的概率运行状态,但运算量加大,给分析带来困难,而且负荷群的蒙特卡洛模型复杂,难以结合到电力系统的调度控制模型中^[19]。当前文献中用于控制的负荷群模型主要包括 ARMAX 模型、状态空间模型、状态队列模型、马尔可夫链模型和双线性偏微分方程模型等^[20-22],文献的作者们在上述负荷群模型的基础设计了各种负荷群跟踪功率目标曲线的控制策略,能达到很好的控制效果。目前,另一被普遍认可的负荷群精确模型为温控负荷群 Fokker-Planck 方程形式的聚合模型^[23],Fokker-Planck 方程为基于蒙特卡洛模拟法多次抽样的数学期望,但没有发现文献给出其求解方法,因此无法将其结合到电力系统有功调度和模型中,本文旨在给出一种 Fokker-Planck 方程的求解方法,并将其纳入到有功控制模型中。

本文在分析温控负荷单个个体物理模型和温控负荷群体 Fokker-Planck 方程聚合模型的基础上,给出了聚合模型的数值拉普拉斯反变换求解方法。通

过算例仿真验证了该求解方法以及将其纳入到电力系统频率仿真模型中的有效性。

1 温控负荷群的 Fokker-Planck 方程模型

1.1 单个温控负荷的物理模型

本文以空调作为温控负荷的例子进行分析,采用热力学一阶模型作为负荷的单个个体模型,模型中计及了随机因素(例如人数的增减、门窗的开关和室内其他物体散发的热量等)的影响^[24],可用维纳过程表示,模型具体如式(1)所示。

$$dx = \left(\frac{K}{C}(x_0 - x) + \frac{s\alpha P_e}{C} \right) dt + dv_t \quad (1)$$

式中: x 为室内温度; x_0 为室外温度; C 为房间热容; K 为房间热导; P_e 为空调电功率; s 为空调的工作模式, s 取值为“1”和“-1”分别表示空调处于制热和制冷状态; α 表示能效比(COP),空调的热功率可以表示为 $P_h = s\alpha P_e$; v_t 为维纳过程,方差为 σ^2 ; t 为时间。

空调房间内温度在温度上限和下限之间周期变化,当其为制冷运行状态,当控制温度到达温度上限时开启制冷,到达温度下限时停止制冷。空调电功率受控制的开关状态影响,如式(2)所示。

$$P_e = mP_N \quad (2)$$

式中: P_N 为空调的额定功率; m 为空调的受控开关状态,取值为 0 和 1 时分别表示空调处于关和开运行状态。

控制器状态的变化受设定温度 x_{set} 和死区大小 δ 的影响,如式(3)所示。

$$m(t_{n+1}) = \begin{cases} 1 & s \left[x - \left(x_{set} - \frac{s\delta}{2} \right) \right] < 0 \\ 0 & s \left[x - \left(x_{set} + \frac{s\delta}{2} \right) \right] > 0 \\ m(t_n) & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 温控负荷群聚合模型

假设负荷群中每个个体具有相同的热力学模型参数, Malhamé 和 Chong 证明了可以采用耦合的 Fokker-Planck 方程(Coupled Fokker-Planck Equations, CFPEs)描述负荷群的动态变化^[23],如式(4)和式(5)所示。

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} = \frac{\partial F_1(x) f_1}{\partial x} + \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2 f_1}{\partial x^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} = \frac{\partial F_0(x) f_0}{\partial x} + \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2 f_0}{\partial x^2} \quad (5)$$

式中: $f_1(x,t)$ 和 $f_0(x,t)$ 分别为在温度 x 、时间 t 时的负荷群处于开和关状态的概率密度; $F_1(x)$ 和 $F_0(x)$ 分别为关状态和开状态下室内温度的负梯度, 表达式分别如式(6)和式(7)所示。

$$F_1(x) = \frac{K}{C}(x - x_0) + \frac{\alpha P_N}{C} \quad (6)$$

$$F_0(x) = \frac{K}{C}(x - x_0) \quad (7)$$

把温度区间 $(-\infty, +\infty)$ 划分为 3 部分, 区间 a: $(-\infty, x_-)$ 、区间 b: $[x_-, x_+]$ 和区间 c: $[x_+, +\infty)$, 其中, $x_- = x_{\text{set}} - \delta/2$ 为温度下限, $x_+ = x_{\text{set}} + \delta/2$ 为温度上限。满足式(8)一式(11)所示的边界条件。

绝对边界条件:

$$f_{1b}(x_-, t) = f_{0b}(x_+, t) = 0 \quad (8)$$

无穷远处边界条件:

$$f_{0a}(-\infty, t) = f_{1c}(t, +\infty) = 0 \quad (9)$$

连续边界条件:

$$f_{0a}(x_-, t) = f_{0b}(x_-, t) \quad (10)$$

$$f_{1b}(x_+, t) = f_{1c}(x_+, t) \quad (11)$$

满足整个时间范围内负荷群中空调个体总数不变的守恒条件:

$$-\frac{\partial f_{0a}(x_-, t)}{\partial x} + \frac{\partial f_{0b}(x_-, t)}{\partial x} + \frac{\partial f_{1b}(x_-, t)}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial f_{1c}(x_+, t)}{\partial x} - \frac{\partial f_{1b}(x_+, t)}{\partial x} - \frac{\partial f_{0b}(x_+, t)}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

由于概率守恒, 各部分的概率密度总和是恒定的, 如式(14)所示。

$$\int_{-\infty}^{x_-} f_{0a}(x, t) dx + \int_{x_-}^{x_+} (f_{0b}(x, t) + f_{1b}(x, t)) dx + \int_{x_+}^{+\infty} f_{1c}(x, t) dx = \int_{-\infty}^{x_-} f_{0a}(x, 0) dx + \int_{x_-}^{x_+} (f_{0b}(x, 0) + f_{1b}(x, 0)) dx + \int_{x_+}^{+\infty} f_{1c}(x, 0) dx \quad (14)$$

将初始的总概率密度设成 1, 则聚合功率如式(15)所示。

$$P(t) = \bar{m}(t) N_{\text{ac}} P_N \quad (15)$$

式中: $\bar{m}(t)$ 为开状态空调所占比例, 表达式如式(16)所示; N_{ac} 为总空调数量。

$$\bar{m}(t) = \left(\int_{x_-}^{x_+} f_{1b}(x, t) dx + \int_{x_+}^{+\infty} f_{1c}(x, t) dx \right) \quad (16)$$

CFPEs 是被普遍认可的负荷群精确模型, 但其求解是个难题, 目前为止未发现其解析解, 需要利用合适的数值求解方法对其进行求解。

2 基于数值拉普拉斯反变换的负荷群聚合模型求解

负荷群的动态特性可以用开状态下空调负荷所占比例随时间的变化进行表达。文献[25]中假定室内温度线性变化, 即 $F_1(x)$ 和 $F_0(x)$ 是恒定的, $d\bar{m}(t)/dt$ 的拉普拉斯变换表达式为

$$\begin{cases} F_1(x) = r = \frac{\delta}{t_{\text{on}}} \\ F_0(x) = c = \frac{\delta}{t_{\text{off}}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: t_{on} 为不计及维纳过程时在开运行状态下室内温度从 x_+ 到 x_- 所用的时间, 如式(18)所示; t_{off} 是不计及维纳过程时在关运行状态下室内温度从 x_- 到 x_+ 所用的时间, 如式(19)所示。

$$t_{\text{on}} = -\frac{C}{K} \ln \left[\frac{x_- - (x_0 - \alpha P_N / K)}{x_+ - (x_0 - \alpha P_N / K)} \right] \quad (18)$$

$$t_{\text{off}} = -\frac{C}{K} \ln \left(\frac{x_+ - T_0}{x_- - T_0} \right) \quad (19)$$

文献[24]给出了拉普拉斯表达式为

$$L \left(\frac{d\bar{m}(t)}{dt} \right) = \int_{-\infty}^{x_+} \frac{1 - e^{\theta_2(s)\delta}}{1 - e^{(\theta_2(s) + \gamma_2(s))\delta}} e^{\gamma_2(s)(x_+ - x)} f_0(x, t_0) dx - \int_{x_-}^{+\infty} \frac{1 - e^{\gamma_2(s)\delta}}{1 - e^{(\theta_2(s) + \gamma_2(s))\delta}} e^{\theta_2(s)(x - x_-)} f_1(x, t_0) dx \quad (20)$$

式中, $\theta_2(s)$ 和 $\gamma_2(s)$ 是中间量, 如式(21)和(22)所示。

$$\theta_2(s) = \frac{r}{\sigma^2} - \frac{1}{\sigma^2} \sqrt{r^2 + 2s\sigma^2} \quad (21)$$

$$\gamma_2(s) = \frac{c}{\sigma^2} - \frac{1}{\sigma^2} \sqrt{c^2 + 2s\sigma^2} \quad (22)$$

在拉普拉斯变换的表达式(20)中, 令 A 和 B 分别如式(23)和式(24)所示。

$$A = \frac{1 - e^{\theta_2(s)\delta}}{1 - e^{(\theta_2(s) + \gamma_2(s))\delta}} e^{\gamma_2(s)(x_+ - x)} \quad (23)$$

$$B = \frac{1 - e^{\gamma_2(s)\delta}}{1 - e^{(\theta_2(s) + \gamma_2(s))\delta}} e^{\theta_2(s)(x - x_-)} \quad (24)$$

A 和 B 独立于初始负荷群的分布, 两者的拉普拉斯反变换是一个非凡的数学问题^[25], 使用数值拉普拉斯反变换建立 $\bar{m}(t)$ 和初始分布的关系, 便得到了模型的解。为了便于进行数值反拉普拉斯变换, 将式(20)转换其等价形式, 如式(25)所示。

$$L\left(\frac{d\bar{m}(t)}{dt}\right) = \int_{-\infty}^{x_+} \frac{\frac{1}{s} - \frac{1}{s} e^{\theta_2(s)\delta}}{\frac{1}{s} - \frac{1}{s} e^{(\theta_2(s)+\gamma_2(s))\delta}} e^{\gamma_2(s)(x_+ - \lambda)} f_0(x, t_0) dx - \int_{x_-}^{+\infty} \frac{\frac{1}{s} - \frac{1}{s} e^{\gamma_2(s)\delta}}{\frac{1}{s} - \frac{1}{s} e^{(\theta_2(s)+\gamma_2(s))\delta}} e^{\theta_2(s)(\lambda - x_-)} f_1(x, t_0) dx \quad (25)$$

式(25)为拉普拉斯变换基本表达式(26)一式(29)的组合。

$$L^{-1}\left(\frac{1}{s}\right) = 1 \quad (26)$$

$$L^{-1}\left(e^{a_1 - a_2 \sqrt{s+a_3}}\right) = \frac{a_2}{2\sqrt{\pi}} t^{-1.5} e^{a_1 - \frac{a_2^2}{4t} - a_3 t} \quad (27)$$

$$L^{-1}[G_1(s) \cdot G_2(s)]|_{t=t_N} \approx \sum_{j=0}^N g_1(t_j) g_2(t_{N-j}) \tau \quad (28)$$

$$g_2(t_N) = L^{-1}[G_3(s)/G_1(s)]|_{t=t_N} \approx \left[g_3(t_N) - \sum_{j=1}^N g_1(t_j) g_2(t_{N-j}) \tau \right] / g_1(t_0) \tau \quad (29)$$

式中: a_1 、 a_2 和 a_3 为实数, 并且 a_2 为正数; $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 和 $G_3(s)$ 是 $g_1(t)$ 、 $g_2(t)$ 和 $g_3(t)$ 的拉普拉斯变换形式, 并且满足 $G_1(s)G_2(s) = G_3(s)$ 。

数值反拉普拉斯变换后, $d\bar{m}(t)/dt$ 表达形式如式(30)所示。

$$\left[\frac{d\bar{m}(t_0)}{dt} \quad \frac{d\bar{m}(t_1)}{dt} \quad \dots \quad \frac{d\bar{m}(t_N)}{dt} \right]^T = \begin{bmatrix} T_{H0} \cdot f_0(x, t_0) - T_{H1} \cdot f_1(x, t_0) \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中, T_{H0} 和 T_{H1} 分别是 A 和 B 的反变换矩阵。

令 T_R 表示梯形积分矩阵, 则:

$$\int_0^T g(t) dt \approx \frac{\tau}{2} \left(g(t_0) + 2 \sum_{j=1}^{N-1} g(t_j) + g(t_N) \right) = \quad (31)$$

$$T_R \cdot [g(t_0) g(t_1) \dots g(t_N)]^T$$

可以得到开状态空调负荷占比随时间的变化, 如式(32)所示。

$$\left[\bar{m}(t_0) \bar{m}(t_1) \dots \bar{m}(t_N) \right]^T = T_R \cdot T_{H0} \cdot f_0(x, t_0) - T_R \cdot T_{H1} \cdot f_1(x, t_0) \quad (32)$$

式(32)为负荷群 Fokker-Planck 方程聚合模型的数值拉普拉斯反变换解。

3 仿真分析

3.1 聚合模型的数值拉普拉斯反变换求解仿真

假设有一 10 000 台空调组成的负荷群, 空调的

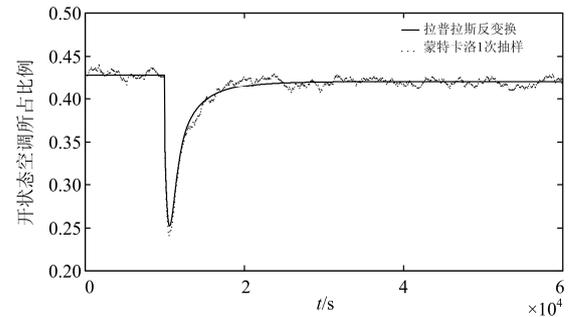
仿真模型采用一阶物理模型, 影响空调工作周期的热导、热容、外界环境温度和空调热功率等参数从文献[20]中选取, 如表1所示。仿真中设置的时间和温度步长分别为 1 s 和 0.01 °C。

表 1 影响空调工作的参数

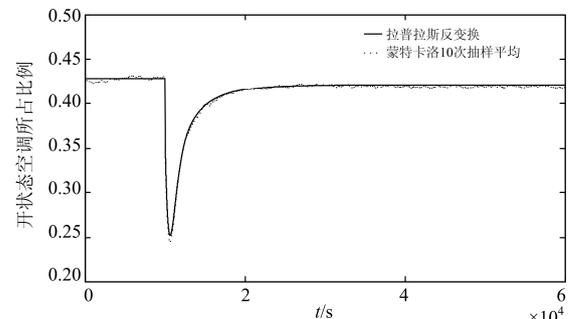
Table 1 Parameters which affect the operating of air conditioner

空调运行参数	取值
热导 K	500 W/°C
热容 C	3.6×10^7 J/°C
热功率 P_h	1.4×10^4 W
COP α	2.5
设定温度 x_{set}	20 °C
控制死区 δ	0.5 °C
室外温度 x_o	32 °C
噪声标准差 σ	0.01 °C·s ^{-1/2}

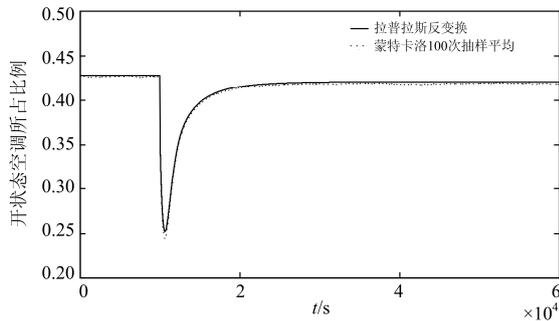
假定负荷群运行到时刻 10 000 s 时, 所有空调均调高 0.2 °C。分别采用蒙特卡洛模拟法和基于数值拉普拉斯反变换的聚合模型求解法得到负荷群的开状态空调负荷占比随时间的变化, 如图 1 所示, 其中, 图 1(a)、(b)、(c)、(d)分别表示采用蒙特卡洛法抽样 1 次以及 10、100、1000 次抽样平均时得到的空调开状态所占比例与基于数值拉普拉斯反变换求得的聚合模型解的对比。通过对比可以看出, 反拉普拉斯变换结果和蒙特卡洛结果相近, 随着蒙特卡洛抽样次数的增多, 抽样的平均越来越接近于反拉普拉斯变换结果, 验证了所提方法的有效性。



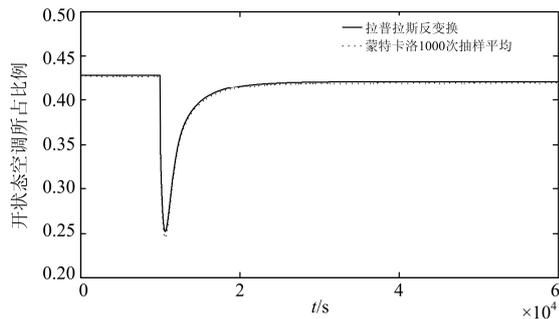
(a) 反拉普拉斯求解和蒙特卡洛1次抽样对比



(b) 反拉普拉斯求解和蒙特卡洛10次抽样平均对比



(c) 反拉普拉斯求解和蒙特卡洛100次抽样平均对比



(d) 反拉普拉斯求解和蒙特卡洛1000次抽样平均对比

图 1 反拉普拉斯求解和蒙特卡洛仿真结果对比

Fig. 1 Comparison of numerical inverse Laplace transform solving method and Monte Carlo method

3.2 计及负荷分散式控制的电力系统频率响应仿真

采用根据频率偏差大小线性改变空调设定温度的负荷分散式控制策略。空调正常运行时, 空调室内温度在静态设定温度的上下限之间周期运行。当系统出现大功率缺额时, 频率持续下降, 频率偏差超出设定的死区后, 空调控制器根据频率偏差与死区差值的大小线性调高处于制冷状态空调的设定温度, 空调室内温度变为在动态设定温度的上下限之间周期运行, 相当于减小了空调工作周期的占空比, 减少了功率消耗。反之, 当频率升高超出死区后, 空调控制器线性调低空调的设定温度, 增加空调的功率消耗。

以图 2 所示的 IEEE 算例 3 机 9 节点系统为例, 验证将反拉普拉斯变换求解方法纳入到电力系统频率仿真模型中的有效性。发电机、负荷和网络参数参见文献[26], 空调参数在表 1 取值。

假设系统无故障运行到 10.0 s 时, 3 号母线机组跳闸失去 85 MW 的发电, 约占系统总发电的 26.6%。当空调负荷不参与控制时, 故障后, 1 号和 3 号母线发电机组的调速系统动作, 增加出力以补偿系统功率缺额, 阻止频率偏离额定值。频率的动态响应如图 3 中点划线所示, 在系统出现大功率缺额后

4.30 s, 频率下降到最低值 58.38 Hz。假设 5 号母线负荷节点含有 60%比例的可控空调负荷参与控制, 考察对空调负荷实施分散式控制时的频率变化, 如图 3 中实线所示, 空调负荷参与频率响应后, 系统受扰后的频率波动减小, 最低值为 59.32 Hz。

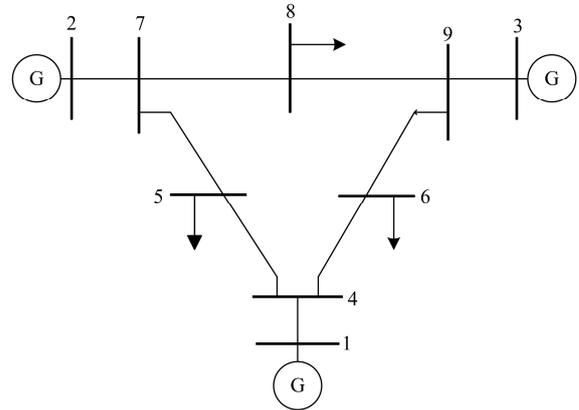


图 2 3 机 9 节点系统结构图

Fig. 2 3-machine 9-bus system

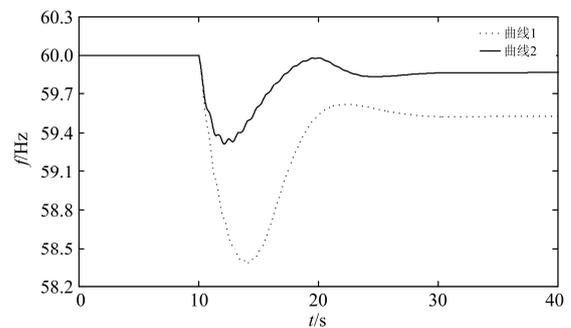


图 3 含可控负荷与不含可控负荷时频率变化对比

Fig. 3 Comparison of frequency response with and without controllable loads

4 结论

鉴于温控负荷群具有作为可调度资源纳入到传统发电调度控制体系中的潜能, 为了方便分析和控制温控负荷群, 本文提出了一种基于数值拉普拉斯反变换的温控负荷群 Fokker-Planck 方程聚合模型求解方法。在介绍温控负荷的单个个体的物理模型和 Fokker-Planck 方程聚合模型的基础上, 采用数值拉普拉斯反变换法对 Fokker-Planck 方程聚合模型进行求解。通过算例仿真对比, 验证了温控负荷群 Fokker-Planck 方程聚合模型的数值拉普拉斯反变换解为蒙特卡洛模拟法的数学期望, 通过对 3 机 9 节点系统仿真, 验证了该求解模型结合到电力系统频率仿真模型中控制效果的有效性。

参考文献

- [1] 金娜, 刘文颖, 曹银利, 等. 大容量机组一次调频参数对电网频率特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 91-95, 100.
JIN Na, LIU Wenyong, CAO Yinli, et al. Influence on the grid frequency characteristic by the parameters of primary frequency modulation of large capacity generator units[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 91-95, 100.
- [2] 李中豪, 黄屹俊, 张沛超, 等. 大型风燃协调等效电厂的自动发电控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 44-50.
LI Zhonghao, HUANG Yijun, ZHANG Peichao, et al. A study about the automatic generation control strategy of large scale wind-gas coordinating equivalent power plant[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 44-50.
- [3] 陈珍, 胡志坚. 基于 PSO-BBO 混合优化算法的动态经济调度问题[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 44-49.
CHEN Zhen, HU Zhijian. A modified hybrid PSO-BBO algorithm for dynamic economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 44-49.
- [4] 陈璟华, 梁丽丽. 计及不确定性和火电机组禁运域的含风电电力系统动态经济调度[J]. 陕西电力, 2017, 45(3): 67-72.
CHEN Jinghua, LIANG Lili. Dynamic economic dispatch of power system with wind power considering uncertainties and prohibited zones of thermal power unit[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(3): 67-72.
- [5] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0017-x
- [6] 樊艳芳, 钟显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.
FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55-60.
- [7] 游金阔, 黄霆, 黄道姗, 等. 基于改进遗传算法的交直流系统低压减载优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 40-47.
YOU Jinkuo, HUANG Ting, HUANG Daoshan, et al. Under-voltage load shedding optimization allocation for AC/DC hybrid system based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 40-47.
- [8] 李泓泽, 王宝, 苏晨博, 等. 可中断负荷参与高峰时段市场备用选择评估及效益测算[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 39-44.
LI Hongze, WANG Bao, SU Chenbo, et al. Selection assessment of interruptible load participating in market reserve during peak period and benefit measurement[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 39-44.
- [9] 朱城香, 杨俊华, 陈思哲, 等. 智能电网背景下基于人工智能理论的需求响应技术[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 63-69.
ZHU Chengxiang, YANG Junhua, CHEN Sizhe, et al. Demand response technologies based on artificial intelligence theories in smart grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 63-69.
- [10] 蔡敏, 沈培锋, 朱红, 等. 基于模糊聚类的配电网负荷特性分析[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 25-27, 39.
CAI Min, SHEN Peifeng, ZHU Hong, et al. Load characteristic analysis of distribution grid based on fuzzy clustering[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 25-27, 39.
- [11] 李翔, 杨淑霞, 张红斌. 供电服务质量评价方法研究[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 34-38.
LI Xiang, YANG Shuxia, ZHANG Hongbin. Research on assessment method for power supply service quality[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 34-38.
- [12] 迟远英, 牛东晓, 李向阳, 等. 基于物元分析理论的供电服务质量评价方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 33-39.
CHI Yuanying, NIU Dongxiao, LI Xiangyang, et al. Research on evaluation of power supply service quality based on the matter-element analysis theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 33-39.
- [13] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6, 12.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6, 12.
- [14] CALLAWAY D S, HISKENS I A. Achieving controllability of electric loads[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 184-199.
- [15] 张延宇, 曾鹏, 李忠文, 等. 智能电网环境下空调系统

- 多目标优化控制算法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1819-1826.
- ZHANG Yanyu, ZENG Peng, LI Zhongwen, et al. A multi-objective optimal control algorithm for air conditioning system in smart grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1819-1826.
- [16] 王东, 曾沅, 穆云飞, 等. 采用温控负荷控制技术的新能源优化利用方法[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3457-3462.
- WANG Dong, ZENG Yuan, MU Yunfei, et al. An optimization method for new energy utilization using thermostatically controlled appliances[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3457-3462.
- [17] 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.
- [18] 刘萌, 褚晓东, 张文, 等. 基于多样性保持的空调负荷群调度控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3674-3682.
- LIU Meng, CHU Xiaodong, ZHANG Wen, et al. Dispatch and control strategies for air-conditioning load groups based on maintenance of load diversity[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3674-3682.
- [19] MOLINA A, KESSLER M, FUENTES J A, et al. Probabilistic characterization of thermostatically controlled loads to model the impact of demand response programs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 241-251.
- [20] CALLAWAY D S. Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation, with application to wind energy[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1389-1400.
- [21] BASHASH S, FATHY H K. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1318-1327.
- [22] MATHIEU J L, KOCH S, CALLAWAY D S. State estimation and control of electric loads to manage real-time energy imbalance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 430-440.
- [23] MALHAME R, CHONG C Y. Electric load model synthesis by diffusion approximation of a high-order hybrid-state stochastic system[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1985, 30(9): 854-860.
- [24] ALVAREZ C, MALHAME R P, GABALDON A. A class of models for load management application and evaluation revisited[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(4): 1435-1443.
- [25] MALHAME R, CHONG C Y. On the statistical properties of a cyclic diffusion process arising in the modeling of thermostat-controlled electric power system loads[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1988, 48(2): 465-480.
- [26] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability[M]. New York: IEEE Press, 1993: 38-39.

收稿日期: 2016-11-23; 修回日期: 2017-04-23

作者简介:

刘 萌(1986—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: liumeng603@163.com

梁 雯(1986—), 女, 博士, 研究方向为高电压与绝缘技术。E-mail: shadowmermaid@126.com

(编辑 周金梅)