

基于电力电子技术有载调压变压器的无冲击调压方法

黄俊杰, 李晓明

(武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

摘要: 提出以电力电子器件为分接开关的有载调压变压器无冲击调压方法。该方法考虑了调压绕组的改变引起的变比变化和漏电阻、漏电感大小的变化。为考虑铁磁特性, 变压器铁芯用非线性电阻和电感来等效。由变压器的空载实验数据, 得到描述两者非线性特性的分段线性表达式。通过对变压器等值模型的分析, 得出无冲击有载调压时刻的求解方法。在这一时刻进行分接开关通断控制, 可以使调压过程按系统运行的需要而改变, 并保证负载电流连续、平滑、无冲击。阐述了传统的以负载阻抗角确定调压时刻是本方法的特例。通过仿真及实验验证了这一方法能够实现快速、无冲击、可靠调压过程。

关键词: 有载调压变压器; 无冲击; 铁磁特性; 电力电子学; 晶闸管

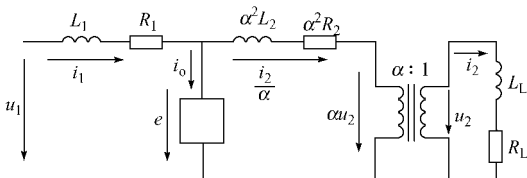
中图分类号: TM423

0 引言

随着电力电子技术的发展, 电力电子设备, 如晶闸管, 作为调压分接开关得到了广泛应用, 使电压调节迅速, 调节效果明显要好于机械式的有载调压装置^[1-2]。但是, 晶闸管触发、导通时刻的选择对调压暂态过程有很大的影响。为实现无冲击调压过程, 文献^[3]介绍了晶闸管导通时刻的确定方法, 但没有考虑调压过渡电阻或电抗、调压绕组变化的影响^[4], 也没有考虑变压器铁芯磁滞、磁饱和及涡流损失的影响^[5-6]。本文针对这一情况, 在考虑上述因素的前提下, 研究了以晶闸管作为调压分接开关的调压过程, 得到了无冲击调压时刻的确定方法, 通过仿真和实验验证了这一方法的正确性。

1 有载调压变压器模型分析

采用如图 1 所示的变压器模型分析有载调压过程。对于励磁支路, 现暂时用一个黑盒子表示。



α 为变比; u_1, i_1, R_1, L_1 分别为变压器一次侧的电压、电流、等效漏电阻和电感; $\alpha^2 R_2, \alpha^2 L_2$ 分别为变压器二次侧等效漏电阻和电感折算到一次侧的值; u_2, i_2 分别为二次侧的电压、电流; e, i_0 分别为励磁支路的电压、电流; R_L 和 L_L 的串联支路表示负载

图 1 变压器模型
Fig. 1 Transformer model

按图 1 所示电路, 可列出以下方程:

$$\begin{cases} u_2 = R_L i_2 + L_L \frac{di_2}{dt} \\ u_1 - e = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \\ e = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + u_2 \\ i_1 = \frac{i_2}{\alpha} + i_0 \\ i_0 = f(e) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中第 5 个方程就是用来描述变压器铁芯磁滞、磁饱和及涡流损失的影响。

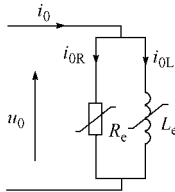
在进行电压调整之前, 电源的电压保持稳定。一、二次侧的等效漏电阻和漏电感的额定值可以由短路实验得到的数据求得, 调压前后变比、绕组数目的变化已知时, 这些数值要做相应修改。而负载的等效电阻和电感可以由采集到的二次侧电流和电压经计算获得, 并设在调压过程中负载不发生改变。如果变压器的铁磁特性已知, 即 i_0 随时间的变化规律已知, 则可以求解出电流 i_2 。由于这是一个 1 阶微分方程, 电流 i_2 的解中将含有一个稳态分量和一个随时间衰减的暂态分量。显然, 无冲击调压过程就是要求这个暂态分量的值为 0, 这与调压分接开关的动作时刻密切相关。

2 有载调压变压器铁磁特性建模

目前变压器的铁磁特性的建模方法很多^[7-11], 但大多是基于电磁理论, 得到的数学公式复杂, 实际使用起来不方便。本文采用通过测量变压器空载电压、电流及空载有功损失的方法来建立分段线性化

收稿日期: 2008-11-19; 修回日期: 2008-03-02。

的变压器铁磁特性的模型^[12-13]。空载实验等值模型如图 2 所示,由于变压器的漏阻抗相对于励磁阻抗而言很小,所以忽略。



u_0, i_0 分别为空载电压和电流; R_c, L_c 分别为非线性电阻和电感; i_{0R}, i_{0L} 分别为变压器空载时流过 R_c 和 L_c 的电流

图 2 空载实验等值模型

Fig. 2 Equivalent model for non-load experiment

在空载实验时,对变压器施加固定频率的正弦电压,测量在交流稳态下进行,不存在直流分量。这样按电压由低到高的顺序对变压器进行 N 次空载实验,每次施加的正弦空载电压为: $u = \sqrt{2}U \sin t$,有效值分别为 U_1, U_2, \dots, U_N ,相应得到空载电流的有效值分别为 I_1, I_2, \dots, I_N ,空载功率损耗依次为 P_1, P_2, \dots, P_N 。

2.1 非线性电阻 R_c 的 $U-I_{0R}$ 特性曲线

当对变压器施加的正弦电压较低时, R_c 不会表现出非线性,可以认为 R_c 是一个线性电阻,所以流过 R_c 的电流有效值为:

$$I_{0R,i} = \frac{P_i}{U_i} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: $I_{0R,i}$ 为 N 次空载实验中第 i 次流过 R_c 的电流有效值。

在绘制 $U-I_{0R}$ 特性曲线时,以坐标原点为起始点,最初的几个点按式(2)计算。把这些点依次连接起来,应为一条斜率固定的直线。当对变压器施加的正弦电压增加, R_c 表现出非线性时,根据功率的表达式,有

$$P_i = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} u_i i_{0R,i} d t \quad (3)$$

式中: u_i, P_i 分别为第 i 次空载实验外加空载电压和空载有功损耗,可以测得。

本次空载实验之前的 $U-I_{0R}$ 关系已知,而且在每个线段内 $U-I_{0R}$ 关系是线性的,所以式(3)又可写为:

$$P_i = 2 \int_{\arcsin \frac{U_{i-1}}{U_i}}^{\arcsin \frac{U_i}{U_i}} \frac{u_i^2}{R_j} d t + 2 \int_{\arcsin \frac{U_{i-1}}{U_i}}^{\arcsin \frac{U_i}{U_i}} \frac{u_i^2}{R_i} d t \quad (4)$$

式中: $R_i = \frac{U_i - U_{i-1}}{I_{0R,i} - I_{0R,i-1}}$, 为线段 i 的线性电阻值。

对于式(4)等号右边第 1 项,采用分段积分的方

法可以求得;对于式(4)等号右边第 2 项,设在积分区间内 $U-I_{0R}$ 为线性关系,则可以求得 $I_{0R,i}$ 。按这种方法依次求解,即可得到反映非线性电阻 R_c 特性的一条 $U-I_{0R}$ 关系曲线,如图 3 所示。

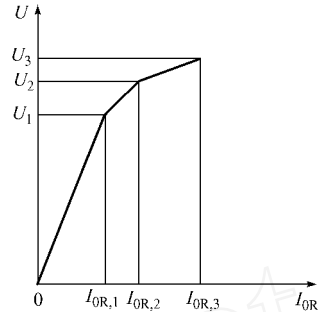


图 3 $U-I_{0R}$ 关系曲线

Fig. 3 Curve of $U-I_{0R}$

2.2 非线性电感 L_c 的 $-I_{0L}$ 特性曲线

由于施加的空载电压为稳定的交流电压,所以产生的磁链为: $\psi = -\sqrt{2}U \cos t$, 不含直流分量。进行 N 次空载实验,在各空载电压下的磁链有效值分别为: $\sqrt{2}U_1/\omega, \sqrt{2}U_2/\omega, \dots, \sqrt{2}U_N/\omega$ 。当空载电压较小时, R_c 在线性段上,所以有:

$$I_{0L,i}^2 = I_i^2 - I_{0R,i}^2 \quad (5)$$

式中: $I_{0L,i}$ 为第 i 次空载实验流过电感 L_c 的电流有效值; I_i 为第 i 次空载实验流过 R_c 和 L_c 组成的阻抗的电流有效值。

这样根据空载电流和前面解出的 I_{0R} 即可求出 I_{0L} 的值。然后以坐标原点为起始点,根据磁链与空载电压的关系,即可绘出 $-I_{0L}$ 特性曲线的线性部分。

当空载电压增加, R_c 表现出非线性特性时,根据电流有效值的定义,有

$$I_i^2 = \frac{1}{\omega} \int_0^{\omega t} (i_{0R,i} + i_{0L,i})^2 d t = \frac{2}{\omega} \int_0^{\frac{\pi}{2}} i_{0R,i}^2 d t + \frac{2}{\omega} \int_0^{\frac{\pi}{2}} i_{0L,i}^2 d t \quad (6)$$

式(6)中等号右边第 1 项可由 $U-I_{0R}$ 关系求出,式(6)等号右边第 2 项可按照下式求得:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} i_{0L,i}^2 d t = \int_{\arcsin \frac{U_{i-1}}{U_i}}^{\arcsin \frac{U_i}{U_i}} \left[I_{0L,j-1} + \frac{I_{0L,i} - I_{0L,j-1}}{j - j-1} (\cos t - \cos t_{j-1}) \right]^2 d t \quad (7)$$

式中: $I_{0L,j}$ 为第 j 次空载实验流过 L_c 的电流有效值; ψ_j 为第 j 次空载实验 L_c 的磁链。

式(7)中未知量仅有 $I_{0L,j}$ 可以解出。按这种方法依次求解,即可得到反映非线性电感 L_c 特性的 $-I_{0L}$ 关系曲线。

由于 $U-I_{0R}$ 和 $-I_{0L}$ 的关系曲线都是分段线性的,所以可以分段相加,在 $u \in [U_{i-1}, U_i]$ 区间内,空载电流 i_0 的表达式可写为:

$$i_0 = \left\{ \begin{array}{l} I_{0R,i-1} + \frac{I_{0R,i} - I_{0R,i-1}}{U_i - U_{i-1}} U \\ I_{0L,i-1} + \frac{I_{0L,i} - I_{0L,i-1}}{U_i - U_{i-1}} U \end{array} \right\} \sqrt{2} \sin t + \sqrt{2} \cos t \quad (8)$$

在 $U-I_{0R}$ 和 $-I_{0L}$ 关系曲线的最初线性段,有

$$i_0 = k_1 \sqrt{2} U \sin t + k_2 \sqrt{2} U \cos t \quad (9)$$

式中: k_1, k_2 分别为 $U-I_{0R}$ 和 $-I_{0L}$ 关系曲线图中线性部分斜率的倒数。

3 无冲击调压时刻分析

按实际测量的空载数据,作出 $U-I_{0R}$ 和 $-I_{0L}$ 关系曲线后,由式(8)和式(1)即可解出 i_2 的表达式,得到准确的无冲击调压时刻,可采用传输线(TLM)法来求解^[14]。为验证本方法的正确性,结合工程实际情况,如果能对式(1)假设: $u = e$,且励磁支路的电阻和电感都为线性的,那么式(1)可写为:

$$A \sin(t + \theta) = B i_2 + D \frac{di_2}{dt} \quad (10)$$

式中:

$$A \sin(t + \theta) = \sqrt{2} U \left[(1 - k_1 R_1 + k_2 L_1) \sin t - \left[k_2 \frac{R_1}{\omega} + k_1 L_1 \right] \cos t \right]$$

$$B = \frac{R_1}{\omega} + R_2 + R_L$$

$$D = \frac{L_1}{\omega} + L_2 + L_L$$

解式(10)得:

$$i_2 = \frac{AD}{2B^2 + D^2} \sin(t + \theta) - \frac{AB}{2B^2 + D^2} \cos(t + \theta) + C e^{-\frac{D}{B}t} \quad (11)$$

要实现无冲击过程,应在调压时刻使常数项为0,这样二次侧电流将直接进入稳态,所以有:

$$i_2(0) = \frac{AD}{2B^2 + D^2} \sin \theta - \frac{AB}{2B^2 + D^2} \cos \theta \quad (12)$$

如果把变压器考虑为理想的,即忽略漏电阻、漏电感和励磁支路,式(12)的参数取值为: $A = \sqrt{2} U$, $B = R_L$, $D = L_L$, 则

$$i_2(0) = -\frac{1}{Z_L} \sqrt{2} U \sin \theta \quad (13)$$

式中: Z_L 为负载阻抗; θ 为负载阻抗角。

式(13)表明:投切应选在 $t = \theta$ 时刻,这与传统的以负载阻抗角确定调压时刻的结论是一致的。

4 仿真研究

为验证前面所述的方法,用 MATLAB 对一台虚拟的单相变压器分接头切换过程进行仿真^[15]。变压器参数为:额定容量 $S_N = 20$ kVA;变比 = 10 kV/0.48 kV;一、二次侧的漏电阻、漏电抗的标么值 $R_1 = R_2 = 0.012$; $L_1 = L_2 = 0.0175$;模型考虑铁芯的磁饱和、磁滞引起的非线性,通过实验得到空载数据,获得铁芯的电磁特性。一次侧电源电压 $u = 10 \sqrt{2} \sin t$ kV,负载 $Z_L = (10.368 + j5.022)$ 。切换前变比为额定变比,切换后变比为 0.67。在分接头切换过程中,考虑绕组变化引起的一次侧漏电阻和漏电感的变化。

按上述方法计算,要确保投切过程无暂态,电流无冲击,应在 $i_2 = -25.685$ A 时进行分接开关的切换。仿真的一次侧电流波形如图 4(a) 所示,图 4(b) 为按理想变压器考虑时的一次电流波形。由图 4 可知,按本文方法调压,变压器电流波形保持连续、平滑和无冲击的特性。

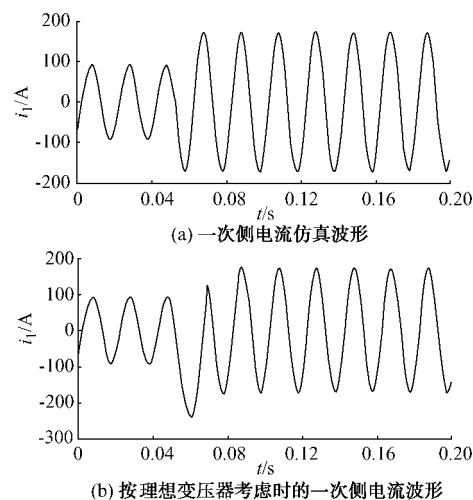


图 4 调压过程中变压器一次侧电流波形
Fig. 4 Current waveform of transformer primary side in regulating process

5 实验研究

实际变压器的铁芯属于软磁材料,磁滞回线狭长,剩磁和矫顽力较小,大部分的励磁支路电感和电阻可以近似为线性元件。在实验中,使用的是特制的单相有载调压变压器,其参数为:额定容量 2 kVA,额定变比 1:1,一、二次侧绕组都平均分为 10 段,引出分接头。额定条件下漏电阻和漏电感分别为 0.97 Ω , 3.08 mH。负载 $(20.6 + j12.9)$ 。实验电路见附录 A,其中 R 的作用是为防止有载调压使绕组发生短路,其值为 1 Ω 。如果 R 投入运行,在计算中可认为一次侧漏电阻增加 R 。

实验中,晶闸管的导通时刻由按前述理论计算得到,在该时刻发导通触发脉冲,然后对晶闸管在电流过零时刻发维持导通脉冲。如要晶闸管关断,只要停止发送触发脉冲,在电流过零时刻晶闸管将自然关断。在一次晶闸管切换过程中,一次侧电流的波形如图5所示,由图可见电流直接进入了稳态,没有产生冲击。

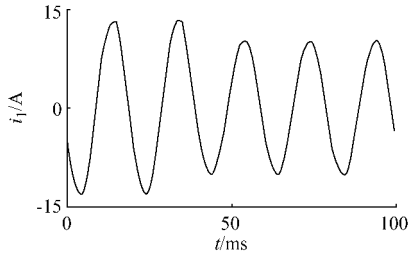


图5 一次侧电流波形
Fig.5 Current waveform of primary side

6 结语

本文在研究以电力电子器件为分接开关的有载调压变压器无冲击调压过程时,考虑了调压绕组的改变引起的变比变化和漏电阻、漏电感大小的变化;对变压器铁芯的铁磁特性用分段线性曲线来描述。经推导获得了变压器分接开关无冲击投切的准确时刻。通过仿真和实验检验说明本方法是有效的。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 李晓明,黄俊杰,尹顶根,等.平滑无冲击电力电子有载调压装置.电力系统自动化,2003,27(10):45-48.
LI Xiaoming, HUANG Junjie, YIN Xianggen, et al. Research of smooth and non-impact power electronics OLTC. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 45-48.
- [2] ECHAVARRIA R, CLAUDIO A, COTOROGEA M. Analysis, design, and implementation of a fast on-load tap changing regulator. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(3): 527-534.
- [3] 李晓明,王琬晴,张水长.基于“臂-桥”结构的无弧有载调压模型.电力系统自动化,2006,30(7):55-59.
LI Xiaoming, WANG Wanqing, ZHANG Shuichang. An arcless OLTC model based on arm-bridge structure. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 55-59.
- [4] 万凯,刘会金,陈允平.考虑铁磁特性的有载调压变压器无暂态切换过程的理论研究.中国电机工程学报,2003,23(6):170-174.
WAN Kai, LIU Huijin, CHEN Yunping. Research on the no transience process of the tap change in the load-ratio voltage transformer considering the ferromagnetic characteristic. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 170-174.
- [5] GUERRA F C F, MOTA W S. Magnetic core model. IET Science Measurement Technology, 2007, 1(3):145-151.
- [6] 王金丽,李金元,徐腊元.大功率电力电子开关用于配电变压器无弧有载调压方案.电力系统自动化,2006,30(15):97-102.
WANG Jinli, LI Jinyuan, XU Layuan. Scheme of arcless on-load voltage regulation for distribution transformer using high power electronic switch. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 97-102.
- [7] 张小青,吴维韩.电力系统中考虑铁磁元件磁滞特性的暂态计算.中国电机工程学报,1993,13(2):8-13.
ZHANG Xiaoqing, WU Hanwei. Calculation of transient in power system containing ferromagnetic elements. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(2): 8-13.
- [8] ANNAKAGE U D, MCLAREN P G, DIRKS E, et al. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 57-61.
- [9] PASQUALE M, BERTOTTI G. Application of the dynamic Preisach model to the simulation of circuits coupled by soft magnetic cores. IEEE Trans on Magnetics, 1996, 32(5): 4231-4233.
- [10] EL-HAWARY M E, SAID M S N, BENBOUZID M E H. Fitting saturation and hysteresis via arctangent functions. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(11): 55-57.
- [11] DE LEON F, SEMLYEN A. Complete transformer model for electromagnetic transients. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(1): 231-239.
- [12] 阮全荣,王亮,施围.一种计及损耗的变压器非线性模型.西安交通大学学报,2006,40(10):1115-1119.
RUAN Quanrong, WANG Liang, SHI Wei. Nonlinear transformer model considering losses. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(10): 1115-1119.
- [13] 胡婷,游大海,金明亮.变压器有载合闸的非线性数学模型及仿真.中国电力,2006,39(11):51-54.
HU Ting, YOU Dahai, JIN Mingliang. Non-linear mathematic model and simulation of transformer energization with load. Electric Power, 2006, 39(11): 51-54.
- [14] THOMAS D W P, PAUL J, OZGONENEL O, et al. Time-domain simulation of nonlinear transformers displaying hysteresis. IEEE Trans on Magnetics, 2006, 42(7): 1820-1827.
- [15] 李晓明,皮伟才,娄颖,等.有载调压中互斥晶闸管开关组的通断控制.高电压技术,2006,32(1):65-68.
LI Xiaomin, PI Weicai, LOU Yin, et al. Method of switching mutual repulsive thyristors switch in the tap. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 65-68.

黄俊杰(1976—),男,博士研究生,主要研究方向:电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail:huangjj@ctgu.edu.cn

李晓明(1955—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制、配网自动化和电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail:xmli@whu.edu.cn

Non-inrush Voltage Regulating Method for OLTC Transformer Based on Power Electronic Technology

HUANG Junjie, LI Xiaoming
(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract : A non-inrush voltage regulating method is proposed for on load tap changer transformer by using the power electronic devices. In this method, the changes of leakage resistance and inductance caused by the change of regulating wires are taken into account. In order to consider the ferromagnetic characteristic, the iron core of transformer is modeled as a nonlinear resistance and a nonlinear inductance. According to the data of no-load experiments, the piecewise linear expressions used to describe the nonlinear characteristic are acquired. By the analysis of the equivalent model of transformer, the expressions to determine the non-inrush moment of regulating process are derived. If the on/off control of tap changer is conducted at this moment, the macroscopic voltage is changed in terms of the demand of system operation; while the waveform of the microcosmic current is smooth, continuous and non-inrush. The conventional method that the regulating moment is determined by the impedance angle of load is a special example of the method presented here. The results of simulation and experiments demonstrate the proposed method can achieve fast, non-inrush and reliable voltage regulating process.

Key words : on load tap changer ; non-inrush ; ferromagnetic characteristic ; power electronics ; thyristor

(上接第 23 页 continued from page 23)

- [15] YU Z, RARDIN R. Lessons learned from the failed risk management for planning natural gas fired power plants// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 18-22, 2006, Montr éal, Canada: 6p.
- [16] MARKOWITZ H. Portfolio selection-efficient diversification of investments. 2nd ed. Malden, MA, USA: Blackwell, 1997.
- [17] BODIE Z, KANE A, MARCUS A J. Investments. 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2005.
- [18] COCHRANE J H. Asset pricing. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2005.
- [19] STOLL H G. Least-cost electric utility planning. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1989.
- [20] WOOD A J, WOTLENBERG B F. Power generation, operation, and control. 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1996.
- [21] KIRCHMAYER L K. Economic operation of power systems. New York, NY, USA: Wiley, 1958.
- [22] CHEN H J, BALDICK R. Optimizing short-term natural gas supply portfolio for electric utility companies. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 232-239.
- [23] WOLF C. The recovery of risk preferences from actual choices. Econometrica, 1983, 5(3): 843-850.

庄晓丹(1981→),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力市场和电力系统稳定。E-mail: zhuangxdzju@gmail.com

洪元瑞(1980→),男,硕士,主要研究方向:电力市场。

J. N. JIANG(1971→),男,助理教授,主要研究方向:电力系统稳定、电力市场及其优化。

An Optimal Short-term Natural Gas Purchase Decision Making Model

ZHUANG Xiaodan^{1,2}, HONG Yuanrui³, J. N. JIANG², GAN Deqiang¹

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Oklahoma University, Oklahoma 73019, United States;
3. East China Grid Company Limited, Shanghai 200002, China)

Abstract : The short-term natural gas markets usually close earlier than the electric power markets. Most electric utility companies have to make fuel purchase decisions for natural gas fired power plants without knowing the actual generation levels, which depend on such uncertain factors as new market driven unit commitments, load variations, dispatch instructions and/or other service requests next day. A novel two-step simulation-optimization framework is proposed for the valuation of day-ahead natural gas purchases. In step one, the optimal generation levels and profit distributions of feasible gas purchase decisions are simulated, and gas purchase decision is made based on utility maximization theory in step two. The impacts of all major factors such as variable load, price volatilities and long-term fuel contract/storage are considered as well. An application of the proposed framework is demonstrated.

Key words : electric utility companies ; natural gas nomination ; electricity production cost ; electricity market