

基于新型发电机定子暂态模型的过电压计算

崔东君¹, 刘念¹, 姜刚², 袁博³

(1. 四川大学电气信息学院, 四川省成都市 610065;

2. 湖北省孝感供电公司调度通信所, 湖北省孝感市 432100; 3. 中国国土资源经济研究院, 北京市 101149)

摘要: 发电机定子绕组中侵入过电压可通过定子绕组电路模型分析计算。但传统的定子绕组电路模型与实际工况不符, 存在误差。文中提出的定子绕组有源模型, 考虑了定子绕组切割磁感线产生的电动势, 将其按不同相角计入定子槽内, 并将各定子槽内电动势细分为电动势单元引入定子绕组模型中。新型定子绕组模型符合实际电机运行情况, 电压仿真说明了利用此模型较传统模型进行电路计算精度更高。

关键词: 定子有源模型; 定子暂态模型; 过电压计算; 电路分析

0 引言

过电压波对电力设备绝缘影响极大, 严重时可导致短路故障^[1-3], 危及人身及设备安全。发电机是电力系统中的重要设备, 其安全性不可忽视。分析过电压对发电机的危害, 预测电机内绝缘故障点显得尤为重要。可以从发电机定子暂态电路模型入手, 计算定子绕组各点电位, 进而分析绝缘安全性, 但该方法对发电机定子电路模型的准确性要求较高。以往的定子电路模型只反映定子绕组自身的电气特性, 没有考虑发电机运行时的电磁场影响, 存在一定的误差。

本文提出的定子有源暂态电路模型将定子绕组线棒切割磁感线产生的电动势按不同相位计入定子模型中, 并依据所在位置分成若干电动势单元。当过电压来袭时, 定子电压与同一时刻的过电压波相互叠加, 符合实际情况, 计算结果更加准确。

1 建立大型发电机有源暂态电路模型

在大型发电机中, 定子三相绕组由单匝短距线圈构成且对称分布。根据大型同步发电机的结构特点, 可只分析其中一相, 给出等效电路模型。过电压冲击电机定子绕组的过程与冲击波在输电线路上的传播过程极为相似, 只是传播的线路被嵌入发电机定子铁芯槽内, 所以类似输电线路的电路模型, 也可将大型发电机定子线棒分段考虑。若不计正常工况下定子线棒切割磁场产生的电动势, 此时发电机暂态网络模型可由定子线棒单元长度导体电阻 R_1 和 R_2 、自感 L_{1c} 和 L_{2c} 、对地电容 C_1 和 C_2 、上下层线棒

间互感 M_{12} 和 M_{21} 、层间电容 C_{12} 和 C_{21} 、对地电阻 R_{g1} 和 R_{g2} 这些集中参数组成的等值电路表示。图 1 所示为大型发电机定子槽内线棒单元的集中参数等值 π 型网络。

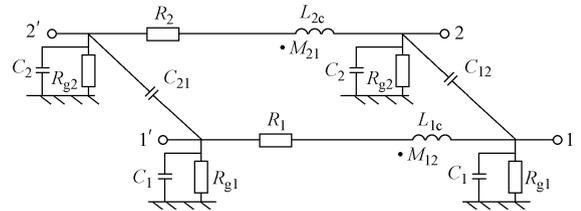


图 1 定子槽内线棒单元集中参数等值网络
Fig. 1 Equivalent network of integrated parameters for winding element in the slot of stators

现将定子槽内线棒的电动势计入模型中。实际交流绕组处于旋转磁场中, 并切割旋转磁场, 产生发电机的感应电动势。由于高次谐波电动势对模型计算精度影响很小, 故本文只考虑基波电动势的作用。单相定子绕组中一根导体线棒切割磁场感应出的交流基波电动势为:

$$E(t) = 2.22f\Phi_1 \quad (1)$$

式中: Φ_1 为定子每极基波磁通; f 为基波频率, $f = Pn/60$, n 为同步转速, P 为极对数^[4]。

发电机定子线棒导体中感应电动势 $e_x(t)$ 随时间变化的波形与发电机气隙磁感应强度 B_x 在空间的分布波形相一致。对于稳定运行的同步发电机, 长度为 l 的线棒导体中感应电动势为 $e_x(t) = B_x lv$, 正比于线棒导体所切割的气隙磁感应强度。

在大型发电机定子绕组中均匀分布着许多定子线棒导体, 这些导体中的感应电动势有效值、频率和波形均相同, 但这些感应电动势 $e_x(t)$ 在时间上存在相位差, 可由下式表示:

$$e_x(t) = \sqrt{2}E(t)\sin(\omega t - n^*\alpha) \quad (2)$$

式中： n^* 为定子槽号数； α 为槽距角； ω 为工频角频率。

假设第 n^* 号定子槽嵌入的绕组线棒被等分成 m 个单元，进而得到发电机有源暂态网络模型中线棒导体单元中的感应电动势为：

$$e(t) = \frac{2.22\sqrt{2}}{m}f\Phi_1\sin(\omega t - n^*\alpha) \quad (3)$$

根据大型发电机的电磁结构，无源模型中的线棒对地电阻、互感、线棒间电容，以及线棒的槽外部分对模型计算精度影响极小，均可忽略不计。因此，新型电机模型可用发电机定子线棒单元长度导体电阻 R 、电感 L 、对地电容 C 、接地电阻 R_0 、线棒导体单元中的感应电动势 $e(t)$ 表示。将各单元模型按其拓扑结构集合起来，构成发电机有源暂态网络模型^[5]，如图 2 所示。

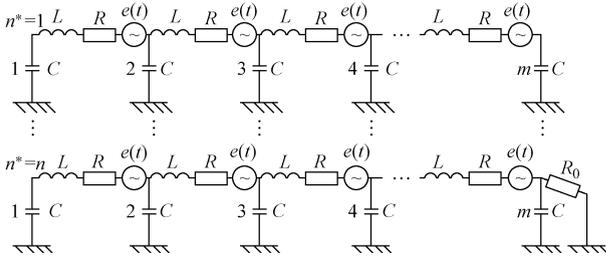


图 2 大型发电机有源暂态网络模型

Fig. 2 Active transient network model of large generator

2 过电压情况下的电路分析计算

现场实时监测大型发电机入口端三相线路，得到冲击电压波 $U_a(t)$ 、 $U_b(t)$ 、 $U_c(t)$ ，将其作为发电机有源暂态电路的入口冲击电压源。在大型发电机有源暂态网络模型的基础上，建立冲击过电压下的大型发电机暂态电路状态方程，求解发电机绕组中的过电压分布。

首先，建立暂态网络节点电压状态方程为：

$$\mathbf{Y}_n \mathbf{V}_n = \mathbf{J}_n \quad (5)$$

$$\text{式中：} \quad \mathbf{Y}_n = \mathbf{A}\mathbf{Y}\mathbf{A}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_n = -\mathbf{A}\mathbf{Y}\mathbf{V}_g \quad (7)$$

\mathbf{Y}_n 为系数矩阵，即暂态网络的节点导纳矩阵，其矩阵元素由发电机有源暂态电路的电气参数 (R, L, C) 组成； \mathbf{A} 为暂态网络拓扑关联矩阵； \mathbf{V}_n 为发电机有源暂态电路的节点电压向量； \mathbf{J}_n 为暂态网络节点电流源向量，可由独立电压源的诺顿等效电流向量 $\mathbf{A}\mathbf{Y}\mathbf{V}_g$ 表示； \mathbf{V}_g 由发电机有源暂态电路模型中的感应电动势 $e(t)$ 组成。

从图 2 取任意一个 π 型子单元，如图 3 所示。

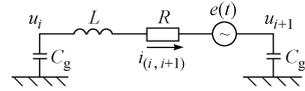


图 3 π 型子单元回路

Fig. 3 Loop circuit of the basic element with the π shape

由对地电容支路得 i 和 $i+1$ 节点电流为：

$$\begin{cases} i_{(i,C_g)} = C_g \frac{du_i}{dt} \\ i_{(i+1,C_g)} = C_g \frac{du_{i+1}}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

在此单元中，电压关系为：

$$u_i - u_{i+1} = Ri_{(i,i+1)} + L \frac{di_{(i,i+1)}}{dt} + e(t) \quad (9)$$

计算过程中，用时间步长 Δt 对暂态网络节点电压状态方程进行离散处理，采用计算机数值求解方法，以提高计算速度。离散后电流关系式为：

$$\begin{cases} i_{(i,C_g)}(t) = \frac{C_g(u_i(t) - u_i(t - \Delta t))}{\Delta t} \\ i_{(i+1,C_g)}(t) = \frac{C_g(u_{i+1}(t) - u_{i+1}(t - \Delta t))}{\Delta t} \\ i_{(i,i+1)}(t) = \frac{1}{R\Delta t + L} [\Delta t(u_i(t) - u_{i+1}(t)) + Li_{(i,i+1)}(t - \Delta t) - e(t)] \end{cases} \quad (10)$$

图 3 所示的 π 型电路满足基尔霍夫电流关系：

$$\begin{cases} i_{(i,i+1)}(t) = i_{(i-1,i)}(t) - i_{(i,C_g)}(t) \\ i_{(i,i+1)}(t) = i_{(i+1,C_g)}(t) + i_{(i+1,i+2)}(t) \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)，可以获得离散形式的节点网络方程组为：

$$\mathbf{A}'\mathbf{u}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t - \Delta t) + \mathbf{C}\mathbf{i}(t - \Delta t) \quad (12)$$

式(11)是一组离散化时间的线性代数方程组，基于此方程组可由 $t - \Delta t$ 时刻大型发电机有源暂态网络模型中的单元线棒支路电流和节点电压求出 t 时刻绕组的节点电位。 \mathbf{A}' 和 \mathbf{B} 矩阵中的元素与网络模型中的电阻、电容、电感参数有关，而 \mathbf{C} 矩阵中的元素只与电阻、电感参数有关^[6-7]。 $\mathbf{u}(t)$ 为待求节点电压向量， $\mathbf{u}(t - \Delta t)$ 和 $\mathbf{i}(t - \Delta t)$ 分别为 $t - \Delta t$ 时刻的节点电压向量和电感支路电流^[8]。

以实际测得的过电压波电压值与发电机机端电压值为初始电压，代入式(10)、式(12)，迭代计算电路中各时刻、各节点的电压值，并存入数据库以便后续处理。

3 仿真分析

以某台装机容量为 600 MW 的汽轮发电机作为仿真计算对象，该汽轮发电机具体参数如下：额定功率 600 MW，额定电压 22 kV，定子铁芯内径

1 312 mm, 定子铁芯总长 6 731 mm, 定子槽数 42。以发电机遭受操作过电压为例, 通过 PSCAD 软件进行仿真计算, 说明有源电路模型较传统模型对暂态过电压计算精度更高, 且更为有效。

首先构造出操作过电压波形, 其数学模型为:

$$u_a = \begin{cases} \frac{U_m}{2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) & 0 < t \leq 120 \mu\text{s} \\ \frac{U_m}{2} \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) & t > 120 \mu\text{s} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\tau_1 = 3\ 571 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 83.3 \mu\text{s}$, 波形如图 4 所示。

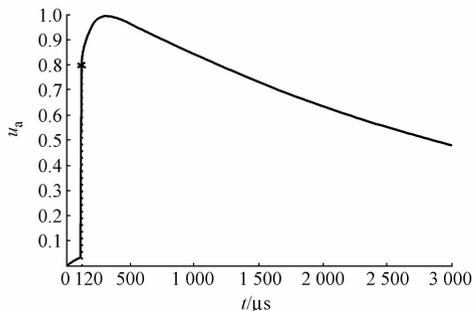


图 4 标准操作过电压波
Fig. 4 Standard operating over-voltage wave

此处选择定子 A 相绕组出线端处 1 号定子槽内绕组进行分析。计算出模型各参数后由 PSCAD 搭建仿真模型, 观测 1 号定子槽内 3 号节点遭遇的操作过电压波形。仿真模型中所观测节点过电压波形如图 5~图 8 所示。图 5、图 6 为过电压波在仿真开始后第 0.191 s、端电压过零点时侵入无源和有源电路模型的仿真波形; 图 7、图 8 为过电压波在仿真开始后第 0.196 s、端电压为正峰值时 2 类电路模型遭遇过电压的仿真波形。

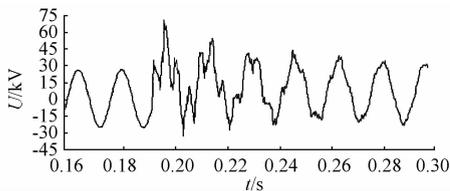


图 5 过电压在机端电压为 0 时侵入无源电路模型
Fig. 5 Over-voltage inrush into passive circuit model when stator terminal voltage is zero

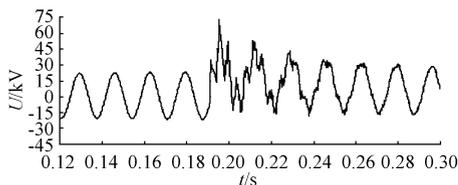


图 6 过电压在机端电压为 0 时侵入有源电路模型
Fig. 6 Over-voltage inrush into active circuit model when stator terminal voltage is zero

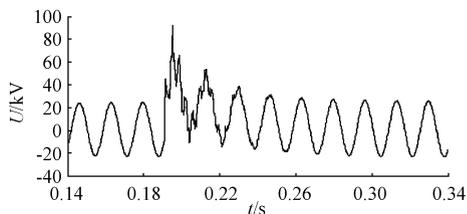


图 7 过电压在机端电压为峰值时侵入无源电路模型
Fig. 7 Over-voltage inrush into passive circuit model when stator terminal voltage is at peak

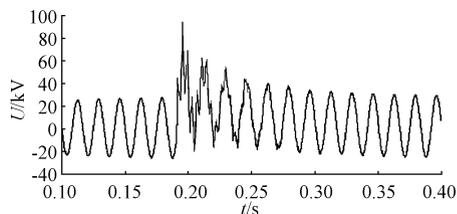


图 8 过电压在机端电压为峰值时侵入有源电路模型
Fig. 8 Over-voltage inrush into active circuit model when stator terminal voltage is at peak

可知, 机端电压过零点时(图 5、图 6), 无源、有源电路模型在过电压侵入情况下, 节点电压波形大体相同, 这是由于此时有源电路模型电动势为 0, 有源电路模型和无源电路模型等效。二者波形因过电压波在定子槽内、外的绕组中传播时发生大量反射、折射现象和各种损耗, 出现小幅阻尼振荡并很快消失。但对于机端电压为峰值时的过电压侵入(图 7、图 8), 有源电路模型仿真波形较无源电路模型振荡强烈, 而且过电压在绕组中作用时间更长。这是由于利用无源电路模型分析过电压侵入定子绕组过程时, 在反射波对侵入过电压波的抵消作用和各种损耗的作用下, 使过电压波急剧衰减消失。而利用有源电路模型分析过电压侵入定子绕组时, 由于各定子槽内电位存在相位差, 反射波对侵入过电压波的抵消作用大为减弱, 从而会有更多的反射、折射现象, 过电压波在绕组内的阻尼振荡明显且持续时间较长, 与实际运行情况更为接近。其他类型过电压, 只是过电压幅值、持续时间与操作过电压不同, 原理与操作过电压一致, 所以发电机定子有源暂态模型可用于任一种过电压情况, 此处不再举例。

4 结语

本文在传统发电机定子电路模型的基础上加入了绕组线棒感应电动势单元, 所得定子绕组有源电路模型更接近实际工况, 仿真算例说明该模型确实提高了过电压计算的准确性。后续研究包括在计算出绕组线棒各点电位后, 结合有限元法对定子槽内绕组部分, 计算内部电场分布, 分析定子槽内部各点

的电场对定子绕组绝缘的影响。

参考文献

- [1] 李连贵,付岚贵. 水轮发电机绝缘事故分析. 东方电机, 1992, 19(1):29-31.
LI Liangui, FU Langui. Analysis of insulation failures for turbine generator units. Dongfang Electrical Machine, 1992, 19(1): 29-31.
- [2] BARKER B, HODGE J M. A decade of experience with generator and large motor reliability// Proceedings of CIGRE Session on Power System Stability, July 31-August 4, 1982, Paris, France; 11-17.
- [3] DICK E P, GUPTA B K. Review of generator surge coordination including generator breakers. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(2): 599-605.
- [4] 谢应璞. 电机学. 成都: 四川大学出版社, 1994.
- [5] 四川大学. 一种发电机冲击过电压预测方法: 中国, ZL200710048241[P]. 2009-05-13.
- [6] GUARDADO J L, COMICK K J. Calculation of machine winding electrical parameters at high frequencies for switching

transient studies. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(1): 33-40.

- [7] GUARDADO J L, COMICK K J. A three-phase model for surge distribution studies in electric machines. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997, 12(1): 24-31.
- [8] 刘念, 谢驰, 滕福生. 发电机定子绕组绝缘介质暂态电场分布的场路分析法. 电力自动化设备, 2006, 26(2):1-4.
LIU Nian, XIE Chi, TENG Fusheng. Field-circuit analysis method of transient electric field in stator winding insulation of generators. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2): 1-4.

崔东君(1984—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:高压电气设备的故障诊断技术。E-mail: cdj1122@126.com.

刘念(1956—),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向:电力设备故障诊断。

姜刚(1982—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向:继电保护。

Over-voltage Calculation Based on a Novel Generator Stator Transient Model

CUI Dongjun¹, LIU Nian¹, JIANG Gang², YUAN Bo³

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Dispatching and Communication Center of Xiaogan Power Company, Hubei Power Grid, Xiaogan 432100, China; 3. Chinese Academy of Land and Resource Economics, Beijing 101149, China)

Abstract: The over-voltage inrush into generator stator windings can be calculated using the stator winding equivalent circuit model. But the traditional stator model cannot accurately represent the stator's electromotive force in realistic working conditions. An active stator winding model is presented by considering the electromotive force resulted from the relative movement of the stator winding with respect to the magnetic fields. Every stator slot will produce electromotive force with different phase angles, while putting the electromotive force into every sub-bar of the winding model and subdividing it. The novel stator winding model reflects the true electrical characteristics of the stator winding. The over-voltage simulation result shows that the novel model has high accuracy in calculating stator transient process.

Key words: active stator model; stator transient model; over-voltage calculation; circuit analysis