

同步发电机瞬态电压调整率实用计算方法

杨建华¹, 林菲¹, 宁宇², 高军³

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 牡丹江电业局, 黑龙江 牡丹江 157000;

3. 国家电网公司 电力调度中心, 北京 100031)

摘要: 提出一种实用算法, 可简便、有效地判断同步发电机组的稳定运行状态。利用同步发电机的简化暂态模型, 在考虑发电机自动调节励磁系统的顶值电压倍数和电压响应比的基础上, 将动态元件的特性方程简化处理, 在电力系统负载突然变化时计算发电机的瞬态电压调整率和端电压的变化趋势。计算方法简便、实用、精确。通过实际工程中同步发电机端电压最大偏移的计算与比较, 验证了该方法的有效性和正确性。

关键词: 同步发电机; 瞬态电压调整率; 励磁系统; 电压响应比

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0022-04

0 引言

在电力系统分析时, 常规潮流计算是针对系统的正常运行状态, 通过系统网络结构所决定的功率分配确定各节点电压。但在实际中, 随着运行条件的变化, 发电机的端电压、负载功率都会发生变化^[1-2]。尽管在一些潮流计算方法中考虑了 PV、PQ 节点的相互转化^[3-5], 也出现了引入控制补偿方式改善发电机电压稳定的方法^[6]和用于电压稳定分析的连续潮流算法^[7], 但却没有考虑如何简便计算负载突然变化引起的发电机电压最大偏差。

同步发电机瞬态电压调整率^[8]是指负载突然变化时, 在发电机端口所产生的电压最大偏差与发电机额定电压之比, 它是判断发电机组稳定运行的一个重要指标。在此, 研究并提出了一种同步发电机瞬态电压调整率的计算方法, 它考虑了同步发电机的简化暂态模型、发电机自动调节励磁系统的顶值电压倍数和电压响应比等参数, 将动态元件的特性方程简化处理, 计算负载突然变化时发电机瞬态电压调整率。在考虑负载的最终电压特性的基础上, 修正发电机端电压的变化趋势。全部计算过程简便, 可以用于实际工程中同步发电机机端电压稳定性的判断和分析。

1 负载变化时刻的电压、电流和电势

如果发电机初始运行状态时的负载为 P_0 和 Q_0 , 端电压为 U_0 , 假设负载突然增加的额定功率为 $P_{\text{add}0}$ 和 $Q_{\text{add}0}$, 在负载变化时近似地认为其等值电阻 r_1 和电抗 x_1 不变, 则有(除时间及时间常数外, 其他各量均用标幺值表示)

$$r_1 = \frac{U_0^2}{(P_0 + P_{\text{add}0})^2 + (Q_0 + Q_{\text{add}0})^2} (P_0 + P_{\text{add}0}) \quad (1)$$

$$x_1 = \frac{U_0^2}{(P_0 + P_{\text{add}0})^2 + (Q_0 + Q_{\text{add}0})^2} (Q_0 + Q_{\text{add}0}) \quad (2)$$

如果以 I_1 表示负载变化时刻的电流, I_{d1} 和 I_{q1} 分别表示电流的 d 轴和 q 轴分量, 则

$$I_1 = \sqrt{I_{d1}^2 + I_{q1}^2} \quad (3)$$

不计发电机定子绕组电阻, 由凸极发电机运行状态的相量图^[9]可推导出下列式子:

$$E'_q = r_1 I_{q1} + (x'_d + x_1) I_{d1} \quad (4)$$

$$0 = -r_1 I_{d1} + (x_q + x_1) I_{q1} \quad (5)$$

其中, E'_q 为发电机的暂态电势; x_q 和 x'_d 分别为发电机的 q 轴同步电抗和 d 轴暂态电抗。

将式(4)和式(5)联立求解, 可得:

$$I_{d1} = (x_q + x_1) I_{q1} / r_1 \quad (6)$$

$$I_{q1} = \frac{E'_q}{r_1 + (x'_d + x_1)(x_q + x_1) / r_1} \quad (7)$$

把式(6)和式(7)代入式(3), 则有

$$I_1 = \frac{E'_q \sqrt{r_1^2 + (x_q + x_1)^2}}{r_1^2 + (x'_d + x_1)(x_q + x_1)} \quad (8)$$

发电机的端电压 U_1 即为

$$U_1 = I_1 \sqrt{r_1^2 + x_1^2} \quad (9)$$

这时, 对应的发电机空载电势变为

$$E_{q1} = U_1 \cos \delta_1 + I_1 x_q \sin(\delta_1 + \varphi_1) \quad (10)$$

其中, $\varphi_1 = \arctan \frac{x_1}{r_1}$, $\delta_1 = \arctan \frac{I_1 x_q \cos \varphi_1}{U_1 + I_1 x_q \sin \varphi_1}$ 。

2 励磁系统的简化模型和影响

如果发电机的自动调节励磁系统不动作, 则 E_{q1} 将最终衰减为初始运行状态时的 E_{q0} , 衰减时间常数为 τ_{d1} 。

由式(6)和式(7)可知:

$$I_{d1} = E'_q / \left(\frac{r_1^2}{x_q + x_1} + x'_d + x_1 \right) \quad (11)$$

最终稳态电流为

$$I_{d1\infty} = E_{q0} / \left(\frac{r_1^2}{x_q + x_1} + x_d + x_1 \right) \quad (12)$$

因此,衰减时间常数 τ_{d1} 为

$$\tau_{d1} = \frac{r_1^2 + (x'_d + x_1)(x_q + x_1)}{r_1^2 + (x_d + x_1)(x_q + x_1)} \tau_{d0} \quad (13)$$

其中, τ_{d0} 为励磁绕组自身的时间常数,其值可通过查找发电机手册得到。

事实上,在负载变化导致发电机端电压改变时,发电机的自动调节励磁系统将调节励磁绕组两端的励磁电压 U_f ,从而影响发电机的电势。自动调节励磁系统的一个重要参数是顶值电压倍数 β ,即励磁系统顶值电压与额定励磁电压 U_{fN} 之比;另一个重要参数是励磁系统电压响应比 U_{resp} ,即由励磁系统电压响应曲线确定的励磁系统输出电压增长率与 U_{fN} 的比值。由于铁心饱和等因素的影响,励磁电压 U_f 的增长曲线是非线性的^[10-11],如图 1 所示。

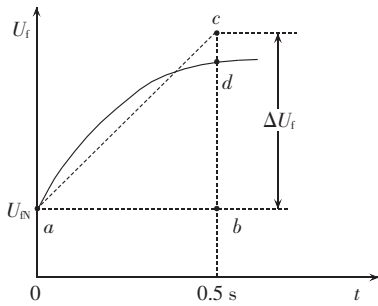


图 1 励磁系统电压响应比 U_{resp} 的确定
Fig.1 Determination of excitation system voltage response ratio

在实际运行中,励磁电压 U_f 增长曲线的开始一段最重要,因此, U_f 的增长率可以由图 1 的直线 ac 确定,其中 a 为通过励磁系统电压响应曲线的初始点,并且取第一个 0.5 s 内增加的面积 A_{abc} 与实际曲线增加的面积 A_{abd} 相同。如果 ΔU_f 为 0.5 s 时励磁系统输出电压增长的大小,那么励磁系统电压响应比就近似为 $U_{resp} = \Delta U_f / (0.5 U_{fN})$ 。

励磁系统应满足的顶值电压倍数如表 1 所示,励磁系统电压响应比如表 2 所示^[8,12]。

考虑了 τ_{d1} 和 U_{resp} 以后, E_q 随时间 t 变化的情况就可以近似地由下式决定:

$$E_q = E_{q0} + (E_{q1} - E_{q0} + U_{resp} E_{fN} \tau_{d1}) e^{-t/\tau_{d1}} - U_{resp} E_{fN} \tau_{d1} + U_{resp} E_{fN} t \quad (14)$$

表 1 励磁系统的顶值电压倍数

Tab.1 Ceiling voltage time of excitation system

发电机类型	β
100 MW 及以上的汽轮发电机	≥ 1.8
50 MW 及以上的水轮发电机	≥ 2
内燃发电机	≥ 1.5
其他	≥ 1.6

表 2 励磁系统的电压响应比

Tab.2 Voltage response ratio of excitation system

发电机类型	U_{resp} / s^{-1}
100 MW 及以上的汽轮发电机	≥ 2
水轮发电机	≥ 2
直流励磁机励磁系统	0.5~1.0
其他	≥ 1

其中, E_{fN} 为发电机额定空载电势。

令 $dE_q / dt = 0$, 则可以求出最小电势 E_{qmin} 对应的时间:

$$t_{min} = \tau_{d1} \ln \left(1 + \frac{E_{q1} - E_{q0}}{U_{resp} E_{fN} \tau_{d1}} \right) \quad (15)$$

将式(15)代入式(14),得:

$$E_{qmin} = E_{q0} + U_{resp} E_{fN} \tau_{d1} \ln \left(1 + \frac{E_{q1} - E_{q0}}{U_{resp} E_{fN} \tau_{d1}} \right) \quad (16)$$

因此,如果在 t_{min} 时发电机的端电压为 U_{min} , 电流为 I_{min} , 则近似有

$$U_{min} = E_{qmin} U_1 / E_{q1} \quad (17)$$

$$I_{min} = E_{qmin} I_1 / E_{q1} \quad (18)$$

假定最终励磁系统产生的电势为 $E_{q\infty}$, 对应的发电机稳态电压为 U_{∞} , 电流为 I_{∞} , 则有

$$U_{\infty} = E_{q\infty} U_1 / E_{q1} \quad (19)$$

$$I_{\infty} = E_{q\infty} I_1 / E_{q1} \quad (20)$$

如果 U_{∞} 超过发电机额定电压(或规定值),那么励磁系统将不会达到其顶值电压,励磁系统一般在 U_{∞} 等于发电机额定电压 U_{CN} 时停止励磁电压的增加,即最终的发电机稳态电势为

$$E_{q\infty} = \begin{cases} \beta E_{q0} & U_{\infty} < U_{CN} \\ E_{q1} U_{CN} / U_1 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (21)$$

3 示例和负载电压特性的应用

某水力发电厂一台发电机的参数如下(电抗为标么值): $P_{GN} = 42 \text{ MW}$, $\cos \varphi_N = 0.8$, $U_N = 6 \text{ kV}$, $x_d = 1.15$, $x_q = 0.75$, $x'_d = 0.37$, $\beta = 1.7$, $U_{resp} = 1.0 \text{ s}^{-1}$, $\tau_{d0} = 3.0 \text{ s}$ 。

初始运行状态时负载有功功率为 8 MW, 功率因数为 0.85。当发电厂的负载增加量为 17 MW、功率因数为 0.4 时,计算发电机端电压(标么值)的变化情况,如图 2 所示,计算值与实际测量值(标么值)的比较如表 3 所示。

用式(15)(16)可以计算出,在负载增加后 0.39 s 时,发电机端电压最小,即发电机瞬态电压调整率达到最大。

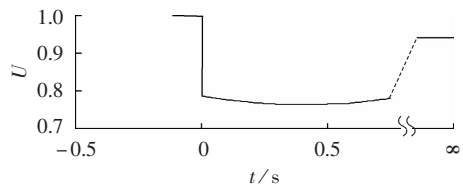


图 2 负载突然增加后发电机端电压的变化

Fig.2 Generator terminal voltage change during sudden load increase

表 3 发电机端电压变化情况的比较

Tab.3 Comparison of generator terminal voltage change

状态	计算值	测量值
初始	1.000	1.000
最小	0.764	0.756
稳态	0.936	0.985

由表 3 可知,发电机端电压稳态值的误差较大,其中一个重要原因是上述计算方法中没有考虑负载的稳态电压特性,下面通过考虑该特性对发电机端电压稳态值进行修正。

负载功率与电压之间的关系一般有多项式形式、指数形式等表示方式^[1-2,13-15],其中指数形式的负载为

$$P=P_0(U/U_0)^{n_p} \quad (22)$$

$$Q=Q_0(U/U_0)^{n_q} \quad (23)$$

其中, U_0 为参考电压,对于一台特定用电设备, U_0 即为额定电压; P_0 和 Q_0 分别为用电设备额定有功和无功功率;对于节点的负载, U_0 、 P_0 和 Q_0 通常分别取为系统初始运行状态时的节点电压、节点负载有功和无功功率; P 和 Q 分别为当电压为 U 时的负载有功和无功功率消耗;指数 n_p 和 n_q 取决于负载的类型,部分负载类型的指数参数如表 4 所示^[1,13,15]。

表 4 部分负载类型的指数参数

Tab.4 Parameters of some load types

负载组成	n_p	n_q
一般工业	0.10	0.6
发电厂厂用电	0.10	1.6
白炽灯	1.54	0
日光灯	1.00	3.0
集中空调	0.20	2.2
室内空调	0.50	2.5
电风扇	0.08	1.6
小型工业电动机	0.10	0.6
大型工业电动机	0.05	0.5
农业用水泵	1.40	1.4

当 $n_p=n_q=2$ 时,为恒阻抗负载; $n_p=n_q=1$ 时,为恒电流负载; $n_p=n_q=0$ 时,为恒功率负载。此外,在电压下降到临界值以下时,如 $U/U_0<0.6$, n_p 和 n_q 将不再能描述负载的电压特性,而且很多用电设备将退出运行。

由式(1)(2)可以得到负载变化时其等值阻抗 Z_1 ,即

$$Z_1 = \frac{U_0^2}{\sqrt{(P_0+P_{\text{ackl}})^2 + (Q_0+Q_{\text{ackl}})^2}} \quad (24)$$

考虑到负载的电压特性,负载突然增加到稳态后,发电机稳态电压 U_∞ 由式(19)求出,对应的功率为 P 、 Q 、 P_{ackl} 和 Q_{ackl} ,可以分别用式(22)和式(23)求出。

用 P 、 Q 、 P_{ackl} 和 Q_{ackl} 替代式(24)中的初始运行功率, U_∞ 替代 U_0 ,便可以求出稳态后的等值阻抗 Z_∞ ,即

$$Z_\infty = \frac{U_\infty^2}{\sqrt{(P+P_{\text{ackl}})^2 + (Q+Q_{\text{ackl}})^2}} \quad (25)$$

假定发电机的内阻抗为 Z_G ,考虑负载电压特性后的发电机稳态电压为 $U_{\infty\text{new}}$,则可以列出 2 个等式:

$$\frac{U_\infty}{Z_1} = \frac{E_{q\infty} - U_\infty}{Z_G} \quad (26)$$

$$\frac{U_{\infty\text{new}}}{Z_\infty} = \frac{E_{q\infty} - U_{\infty\text{new}}}{Z_G} \quad (27)$$

将式(26)和式(27)联立求解,可得:

$$U_{\infty\text{new}} = \frac{E_{q\infty} U_\infty Z_\infty}{(E_{q\infty} - U_\infty) Z_1 + U_\infty Z_\infty} \quad (28)$$

式(19)、(21)~(23)和式(28)构成了一组非线性方程组,利用 Gauss-Seidel 迭代法即可求解出 $U_{\infty\text{new}}$ 。

根据上述示例中实际负荷的性质,取 $n_p=0.1$ 和 $n_q=0.6$,通过以上步骤,可以计算出在考虑负载电压特性后的发电机稳态电压为 0.948 p.u.,更接近于实际值。

4 结论

针对同步发电机瞬态电压调整率的计算,在考虑同步发电机的简化暂态模型、发电机自动调节励磁系统的顶值电压倍数和电压响应比的基础上,将动态元件的特性方程简化处理,提出了一种简便、实用方法。通过考虑负载的稳态电压特性,对发电机端电压稳态值进行了修正,使得发电机端电压的变化趋势更符合实际情况。比较了实际工程中的同步发电机端电压最小值和稳态值的测量与计算误差,验证了整个计算过程的有效性和正确性。在实际工程中,该方法可以用于同步发电机机端电压稳定性的初步分析。

参考文献:

- [1] IEEE Task Force Report. Load representation for dynamic performance analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems,1993,8(2): 472-482.
- [2] IEEE Task Force Report. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems,1995,10(3):1302-1313.
- [3] da SILVA L C P,WANG Y,XU W,et al. Comparative studies on methods of modeling generator var limit for power-flow calculations[J]. Electric Power Components and Systems,2001,56(12): 565-576.
- [4] NAGENDRARAO P S,DEEKSHIT R S. Radial load flow for systems having distributed generation and controlled Q sources[J]. Electric Power Components and Systems,2005,33(6):641-655.
- [5] DIMITROVSKI A,TOMSOVIC K. Slack bus treatment in load flow solutions with uncertain nodal powers[J]. Electrical Power and Energy Systems,2005,27(9):614-619.
- [6] 赵兴勇,张秀彬. 采用先进的高压侧电压控制改善电压稳定性[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):43-46.
ZHAO Xingyong,ZHANG Xiubin. Advanced high side voltage control improves voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):43-46.
- [7] CHIANG H D,FLUECK A J,SHAH K S,et al. CPFLOW:a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations[J]. IEEE Trans on

- Power Systems,1995,10(2):623-634.
- [8] 机械电子工业部. GB10585-1989 国家标准中小型同步电机励磁系统基本技术要求[S]. 北京:中国标准出版社,1989.
- [9] ARRILLAGE J,WATSON N A. Computer modelling of electrical power systems[M]. 2nd ed. New York,USA:John Wiley & Sons, 2001:208-213.
- [10] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:110-127.
- [11] KOTHARI D P,NAGRATH I J. Power system engineering [M]. 2nd ed. New Delhi,India:McGraw Hill,2008:437-439.
- [12] 机械工业部. GB7409-1987 国家标准大、中型同步发电机励磁系统基本技术条件[S]. 北京:中国标准出版社,1987.
- [13] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:72-92.
- [14] EMINOGLU U,HOCAOGLU M H. A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models[J]. Electric Power Systems Research,2005,76(2): 106-114.

- [15] SATYANARAYANA S, RAMANA T, SIVANAGARAJU S, et al. An efficient load flow solution for radial distribution network including voltage dependent load models[J]. Electric Power Components and Systems,2007,35(5):539-551.

(编辑:李育燕)

作者简介:



杨建华

杨建华(1963-),男,河南卫辉人,教授,研究方向为电力系统仿真、规划和电压稳定(E-mail:yang.haag@163.com);

林菲(1963-),男,山西太原人,高级工程师,研究方向为电力系统仿真;

宁宇(1969-),男,黑龙江牡丹江人,高级工程师,研究方向为电力系统数据采集和仿真;

高军(1967-),男,甘肃兰州人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统稳定分析与调度。

Practical algorithm of transient voltage regulation rate for synchronous generators

YANG Jianhua¹, LIN Fei¹, NING Yu², GAO Jun³

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Mudanjiang Electric Power Bureau, Mudanjiang 157000, China; 3. State Grid Electric Power Dispatching Centre, Beijing 100031, China)

Abstract: A practical algorithm of transient voltage regulation rate for synchronous generator is proposed to simply and effectively estimate its stable operation state. With the consideration of its ceiling voltage time and voltage response ratio, the dynamic characters of generator excitation system are simplified based on its simplified transient model, and the transient voltage regulation rate and the voltage regulation of the generators are calculated during sudden load change. The algorithm is simple, practical and precise. The calculation of maximum generator voltage dip for a practical application verifies its effectiveness and correctness.

Key words: synchronous generator; transient voltage regulation rate; excitation system; voltage response ratio