



# 中华人民共和国电力行业标准

DL / T 294.4 — 2019

---

## 发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件 第 4 部分：灭磁容量计算

Specification for equipment of de-excitation and  
overvoltage protection for generators—  
Part 4: De-excitation capacity calculation

2019-06-04 发布

2019-10-01 实施

---

国家能源局 发布

目 次

前言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 发电机转子灭磁回路容量的计算步骤和方法..... 1

附录 A（资料性附录） 发电机饱和的典型模拟方法 ..... 6

## 前 言

DL/T 294《发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件》包括以下四部分：

- 第1部分：磁场断路器；
- 第2部分：非线性电阻；
- 第3部分：转子过电压保护；
- 第4部分：灭磁容量计算。

本部分为 DL/T 294 的第 4 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由中国电力企业联合会标准化管理中心提出。

本部分由电力行业水电站自动化标准化技术委员会（DL/TC 17）归口。

本部分起草单位：国电南瑞科技股份有限公司、国网江西省电力有限公司电力科学研究院、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院。

本部分起草人：许其品、辛建波、杨铭、吴跨宇、谢燕军、袁亚洲、徐在德、邓小君、耿敏彪、魏伟、王坤。

本部分为首次发布。

本部分在执行过程中的意见或建议请反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京白广路二条一号，100761）。

发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件  
第 4 部分 灭磁容量计算

1 范围

本部分规定了同步发电机（以下简称发电机）灭磁及转子过电压保护装置中灭磁容量的计算原则和方法，这些原则和方法是灭磁电阻容量选择的依据。

本部分适用于单机容量为 10MW 及以上含阻尼绕组的凸极和隐极发电机灭磁容量的计算。  
10MW 以下的发电机可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

DL/T 294.2 发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件 第 2 部分：非线性电阻  
DL/T 583 大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

灭磁 de-excitation

将发电机定子、转子中的磁场能量转移和消耗的过程，灭磁的方式主要包括灭磁开关灭磁、续流灭磁、逆变灭磁、线性灭磁、非线性灭磁和组合灭磁等。

3.2

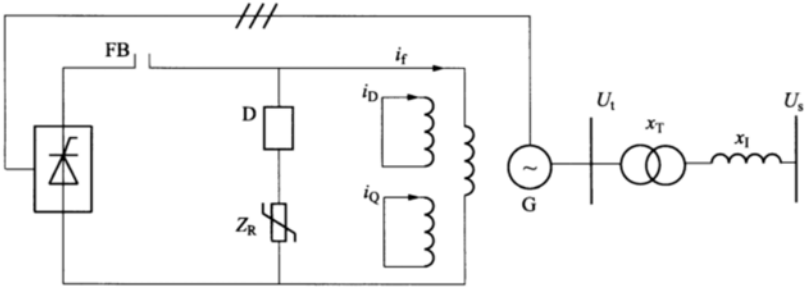
灭磁容量 de-excitation capacity

在灭磁过程中转移和消耗的能量，包含消耗在转子灭磁回路、阻尼绕组以及定子绕组中的能量。

4 发电机转子灭磁回路容量的计算步骤和方法

4.1 灭磁仿真计算模型

4.1.1 发电机灭磁容量计算应采用图 1 所示示意图。



说明：FB 为磁场断路器； $Z_R$  为灭磁电阻；D 为跨接器；G 为发电机； $i_D$ 、 $i_Q$  分别为 d 轴、q 轴等效阻尼绕组电流； $U_1$  为机端电压； $X_T$  为主变压器阻抗； $X_l$  为线路阻抗； $U_s$  为系统电压。

注：对线性电阻和碳化硅非线性电阻，D 可为电子跨接器、磁场断路器常闭触头或机械开关；对氧化锌非线性电阻，D 为二极管； $Z_R$  可为线性电阻也可为非线性电阻。

图 1 灭磁仿真计算示意图

## 4.1.2 电机模型至少应采用考虑 d 轴和 q 轴双阻尼绕组五阶模型：

a) 五阶同步发电机派克方程中的磁链方程见式 (1)：

$$\begin{cases} \psi_d = -L_d i_d + M_f i_f + M_D i_D \\ \psi_q = -L_q i_q + M_Q i_Q \\ \psi_f = -\frac{3}{2} M_f i_d + L_f i_f + M_R i_D \\ \psi_D = -\frac{3}{2} M_D i_d + M_R i_f + L_D i_D \\ \psi_Q = -\frac{3}{2} M_Q i_q + L_Q i_Q \end{cases} \quad (1)$$

b) 电压方程见式 (2)：

$$\begin{cases} u_d = p\psi_d - \omega\psi_q - r i_d \\ u_q = p\psi_q + \omega\psi_d - r i_q \\ u_f = p\psi_f + r_f i_f \\ u_D = p\psi_D + r_D i_D \\ u_Q = p\psi_Q + r_Q i_Q \end{cases} \quad (2)$$

式中： $L_d$ 、 $L_q$ 、 $L_f$ 分别为 d 轴绕组、q 轴绕组、励磁绕组自感；下标 D、Q 分别代表 d 轴、q 轴阻尼绕组； $M_f$ 为定子绕组与励磁绕组间互感变化幅值； $M_D$ 为定子绕组与 d 轴阻尼绕组 D 间互感变化幅值； $M_Q$ 为定子绕组与 q 轴阻尼绕组 Q 间互感变化幅值； $M_R$ 为励磁绕组与 d 轴阻尼绕组 D 间互感； $i_f$ 为励磁电流； $r_f$ 为转子电阻； $L_f$ 为转子电感； $p$ 为微分算子。

c) 采用非线性电阻灭磁时转子电压方程见式 (3)：

$$p\psi_f + r_f i_f + c i_f^\alpha = 0 \quad (3)$$

式中：

 $\alpha$ ——对应非线性电阻灭磁，为非线性电阻系数； $c$ ——非线性电阻位形系数。

采用线性电阻灭磁时转子电压方程见式 (4)：

$$p\psi_f + r_f i_f + k i_f = 0 \quad (4)$$

式中：

 $k$ ——续流灭磁时  $k=0$ ，线性电阻时  $k$  为电阻阻值。

## 4.2 灭磁仿真参数

## 4.2.1 主机厂提供的发电机模型应包括表 1 所列参数。

表 1 发电机模型应包括的参数

序号	名 称
1	发电机额定定子电压 $U_t$
2	发电机额定定子电流 $I_t$
3	额定励磁电压 $U_{fdN}$
4	额定励磁电流 $I_{fdN}$
5	额定空载励磁电流 $I_{fd0}$

表 1 (续)

序号	名 称
6	额定频率 $f_N$
7	d 轴同步电抗 $x_d$ (包括饱和/不饱和值)
8	q 轴同步电抗 $x_q$ (包括饱和/不饱和值)
9	d 轴暂态电抗 $x'_d$ (包括饱和/不饱和值)
10	q 轴暂态电抗 $x'_q$ (包括饱和/不饱和值)
11	d 轴次暂态电抗 $x''_d$ (包括饱和/不饱和值)
12	q 轴次暂态电抗 $x''_q$ (包括饱和/不饱和值)
13	定子漏抗 $x_\sigma$
14	定子开路转子时间常数 $T'_{d0}$
15	d 轴短路暂态时间常数 $T'_d$
16	d 轴短路次暂态时间常数 $T''_d$
17	q 轴短路次暂态时间常数 $T''_q$
18	定子电阻 $r$
19	励磁绕组电阻 $r_f$ (励磁绕组电阻值取 75℃时的电阻值)
20*	饱和系数 $a$
21*	饱和系数 $b$
22*	饱和系数 $n$
*根据饱和曲线确定。	

#### 4.2.2 饱和系数 $a$ 、 $b$ 、 $n$ 计算方法。

在发电机空载特性饱和段开始到 1.3 倍额定电压均匀取  $m$  ( $m>3$ ) 个点, 根据空载特性曲线和式 (5) 拟合确定  $a$ 、 $b$ 、 $n$ , 发电机饱和的模拟方法参见附录 A。

$$I_{f-s} = aE'_q + bE_q'^n \quad (5)$$

式中:

$E'_q$  ——暂态电势的饱和值;

$I_{f-s}$  ——励磁电流。

#### 4.2.3 非线性灭磁电阻参数 $c$ 、 $\alpha$ 应按下列方法计算:

- 根据灭磁电阻的串并联组数及氧化锌、碳化硅的非线性系数得到灭磁电阻参数  $\alpha$ ;
- 根据最严重灭磁工况的灭磁初始电流  $I_{fdmax}$  (一般取 3 倍额定励磁电流) 及最大灭磁控制电压  $u_{de\_max}$  计算  $c$ 。

$$u_{de\_max} = cI_{fdmax}^\alpha \quad (6)$$

#### 4.2.4 线性电阻阻值应满足 DL/T 583 的规定。

### 4.3 灭磁容量计算工况

仿真计算条件: 单机通过主变压器接入无穷大系统。

- 空载误强励。

- 1) 对于隐极发电机, 整流桥控制角为  $0^\circ$ , 发电机定子电压 1.3 倍额定值, 延时 0.5s, 跳磁场断路器。
- 2) 对于凸极发电机, 整流桥控制角为  $0^\circ$ , 发电机定子电压 1.3 倍额定值, 延时 0.3s, 跳磁场断路器。
- b) 负载误强励。负载额定工况运行, 励磁控制角突然变为  $0^\circ$ , 定子过电压保护或定子过负荷保护或转子过负荷保护动作分磁场断路器。

注 1: 对于隐极发电机, 发电机定子电压达到 1.3 倍额定值, 延时 0.5s 保护动作; 对于凸极发电机, 发电机定子电压达到 1.3 倍额定值, 延时 0.3s 保护动作。

注 2: 定子过负荷保护在过电流倍数持续允许的时间后动作, 其动作特性表达式为

$$t = \frac{K_{tc}}{I_*^2 - K_{ST}^2} \quad (7)$$

式中:

$K_{tc}$  —— 定子绕组容量常数, 机组 (空冷发电机除外) 容量小于等于 1200MVA 时,  $K_{tc}=37.5$ ; 其余情况由制造厂家提供的定子绕组允许的过负荷能力确定。

$I_*$  —— 以定子额定电流为基准的标么值。

$t$  —— 允许持续时间, s。

$K_{ST}$  —— 散热系数, 一般可取为 1.02~1.05。

注 3: 转子过负荷保护在过电流倍数持续允许的时间后动作, 其计算表达式见式 (8):

$$t = \frac{C}{I_{fd*}^2 - 1} \quad (8)$$

式中:

$C$  —— 转子绕组过热常数, 由制造厂家提供转子绕组允许的过热条件决定;

$t$  —— 允许持续时间, s;

$I_{fd*}$  —— 励磁电流强励倍数。

- c) 机端三相金属性短路。灭磁容量计算条件为, 发电机额定工况下机端三相金属性短路, 延时 0.15s 分磁场断路器灭磁。

#### 4.4 灭磁容量的计算

##### 4.4.1 转子回路灭磁电阻容量通过式 (9) 进行计算:

$$\begin{cases} E_{ZR} = \int_{t_1}^{t_2} U_{f-de} I_{f-de} dt \\ E_{DQ} = \int_{t_1}^{t_2} I_D^2 r_D dt + \int_{t_1}^{t_2} I_Q^2 r_Q dt \\ E_{fd} = \int_{t_1}^{t_2} I_{f-de}^2 r_f dt \\ E_{st} = \int_{t_1}^{t_2} I_t^2 r dt \\ E_{MK} = \int_{t_3}^{t_4} U_{MK} I_{f-MK} dt \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$E_{ZR}$  —— 灭磁电阻消耗能量;

$E_{DQ}$  —— 阻尼绕组消耗能量;

$E_{fd}$  —— 转子电阻消耗能量;

$E_{st}$  —— 定子绕组消耗能量;

$E_{MK}$  —— 磁场断路器消耗能量, 仿真过程中可作为理想开关, 其耗能为 0;

- $U_{f-de}$  ——灭磁电压;  
 $I_{f-de}$  ——灭磁过程中流过灭磁电阻的电流;  
 $t_1$  ——灭磁开始的时刻;  
 $t_2$  ——灭磁电流为 0 的时刻;  
 $I_t$  ——灭磁过程中的定子电流;  
 $r$  ——定子电阻;  
 $U_{MK}$  ——分磁场断路器时的弧压;  
 $I_{f-MK}$  ——磁场断路器断开过程中流过磁场断路器的电流;  
 $t_3$  ——开始分磁场断路器的时刻;  
 $t_4$  ——磁场断路器断开的时刻。

注：当发电机故障且无法切除时定子绕组有耗能。

4.4.2 根据式（1）～式（4）建立发电机模型，再根据式（9）建立容量计算的模型。

4.4.3 根据 4.3 设定工况等条件。

4.4.4 仿真得到灭磁过程中  $U_{f-de}$ 、 $I_{f-de}$  及灭磁容量。灭磁电阻计算容量取上述工况中计算结果中最大值。灭磁电阻实际容量取计算值的 1.25 倍。

#### 4.5 灭磁电阻容量估算

在工程前期发电机参数不确定时可采用式（10）进行简化计算。

$$E = \frac{1}{2} K_r K_s T_d' r_f (K_{dc} i_{fN})^2 \quad (10)$$

式中：

- $E$  ——灭磁电阻容量，J；  
 $K_r$  ——灭磁电阻容量与转子磁场能量的比例，可取 0.6～0.7；  
 $K_s$  ——饱和系数，凸极机可取 0.6～0.7，隐极机可取 0.4～0.6；  
 $T_d'$  ——发电机直轴短路暂态时间常数，s；  
 $r_f$  ——发电机励磁绕组热态电阻值， $\Omega$ ，可取 75℃时的电阻值；  
 $K_{dc}$  ——电流倍数，可取 3；  
 $i_{fN}$  ——发电机额定负载励磁电流，A。



## 附录 A

## (资料性附录)

## 发电机饱和的典型模拟方法

同步电机励磁电流与空载电势之间由于铁芯饱和而呈现非线性关系。这种非线性关系可用电机空载饱和特性曲线来表示。曲线的形状见图 A.1。

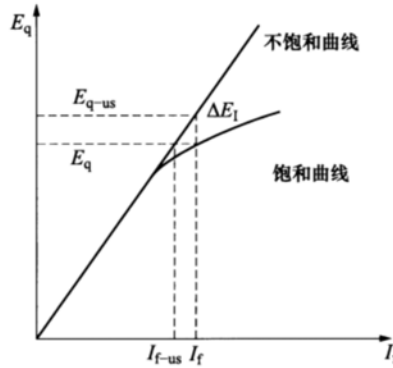


图 A.1 发电机空载特性

不饱和时，空载电势  $E_{q-us}$  等于不饱和的电枢反应电抗  $X_{ad}$  与励磁电流  $I_f$  的乘积，即

$$E_{q-us} = X_{ad} I_f \quad (A.1)$$

计及饱和后，同一励磁电流只能产生如图 A.1 所示  $E_q$  大小的电势，由图中的关系可得

$$E_q = E_{q-us} \cdot \frac{I_{f-us}}{I_f} \quad (A.2)$$

定义式 (A.2) 中  $\frac{I_{f-us}}{I_f} = K_G$  为饱和系数，则有：

$$E_q = \frac{1}{K_G} E_{q-us} \quad (A.3)$$

由此可见，考虑饱和后对空载电势的修正相当于其非饱和值减去  $\Delta E_l$

$$\Delta E_l = E_{q-us} - E_q = E_q (K_G - 1) \quad (A.4)$$

发电机带负荷后，定子绕组流过电流，此时饱和效应体现在合成气隙磁通的饱和上。其饱和特性与空载饱和特性相同。对合成气隙磁通的饱和修正可近似地用对  $E'_q$  电势的修正来代替，因此常用的发电机饱和修正方法可用类似式 (A.3) 的关系对  $E'_q$  进行修正：

$$E'_q = \frac{1}{K_G} E'_{q-us} \quad (A.5)$$

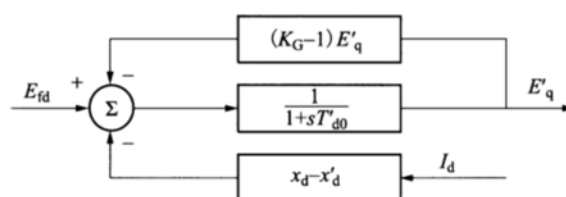
式中： $E'_q$  和  $E'_{q-us}$  分别为暂态电势的饱和值和非饱和值。

以饱和值的  $E'_q$  代入暂态电势变化的微分方程，可得：

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fd} - K_G E'_q - (x_d - x'_d) I_d \quad (A.6)$$

式中， $T'_{d0}$  为定子开路转子时间常数， $E_{fd}$  为励磁电压， $x_d$  为直轴电抗、 $x'_d$  为直轴暂态电抗， $I_d$  为 d 轴电流。

根据式 (A.4) 可画出计及饱和效应的  $E'_q$  动态变化的传递函数框图，如图 A.2 所示。

图 A.2 计及饱和的  $E'_q$  变化框图

由式 (A.4) 及图 A.2 可见, 考虑发电机的饱和效应相当于在以  $T'_{d0}$  为时间常数的惯性环节上增加一负反馈输入, 起到抵消部分  $E_{fd}$  值的作用。而用式 (A.4) 微分方程解出的电势值考虑了饱和之后的数值。

已知不饱和曲线  $I_{f-us}$  与  $E'_q$  的关系是线性的

$$I_{f-us} = aE'_q \quad (A.7)$$

饱和曲线  $I_{f-s}$  与  $E'_q$  的关系是非线性的, 可近似地表示为

$$I_{f-s} = aE'_q + bE_q'^n \quad (A.8)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $n$  的参数值可根据实际饱和曲线用拟合的方法求出。

中 华 人 民 共 和 国  
电 力 行 业 标 准  
发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件  
第 4 部分：灭磁容量计算  
DL/T 294.4—2019

\*

中国电力出版社出版、发行  
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)  
北京传奇佳彩印刷有限公司印刷

\*

2019 年 11 月第一版 2019 年 11 月北京第一次印刷  
880 毫米×1230 毫米 16 开本 0.75 印张 21 千字  
印数 001—500 册

\*

统一书号 155198·1676 定价 15.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究  
本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换



中国电力出版社官方微信



电力标准信息微信

为您提供 最及时、最准确、最权威 的电力标准信息



155198.1676