

核电厂低压配电系统接地故障保护的设计与研究

盛 龙, 王志坚

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 结合标准规范, 给出了低压配电系统接地故障保护的设计原则及其与上下级保护配合的整定要求, 设计了核电厂低压配电系统接地故障保护的典型配置方案。梳理了国内外核电厂低压配电系统发生接地故障造成变压器零序保护越级动作的案例, 并进行原因分析。在典型配置方案的基础上, 对核电厂低电压厂用电系统接地故障保护措施提出了改进建议。通过工程实践, 说明改进后的方案可在核电厂低压配电系统接地故障保护的设计中应用和推广。

关键词: 核电; 低压; 接地故障; 保护配合; 零序电流

Design and research of earth fault protection in low voltage distribution system of nuclear power plant

SHENG Long, WANG Zhijian

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: According to the norms and standards, elaborate the design principles and stage difference coordination of earth fault protection in low voltage distribution system. Describe the typical schemes of earth fault protection in nuclear power plant. Detailed analysis and discussion are given out specific to the override trip accidents which are generated by earth fault. Based on the typical schemes, some improvement measures for earth fault protection design of low voltage distribution system in NPP are proposed. Popularization and effectiveness are verified through practical application in earth fault protection design of low voltage distribution system in one particular project.

Key words: nuclear power; low voltage; earth fault; protection cooperation; zero sequence current

0 引言

核电厂低压配电系统主要为380 V/220 V厂用电设备提供交流电源。低压厂用电系统在运行中可能会因为内部绝缘损坏或老化而发生接地故障。

接地故障可能使人身间接遭受电击, 也可能因为接地点所形成的电弧、电火花造成火灾, 甚至在特殊情况引发爆炸等事故^[1-2]。

大量的现场统计数据表明, 电网运行过程中, 接地故障短路次数占有故障短路次数的85%以上^[3]。另外, 根据近几年核电厂的运行经验反馈, 也曾发生多起低压馈线回路接地故障。因此, 在工程设计过程中, 对于低压配电系统中的接地故障应予以重点分析。通过设置有效的保护措施, 保障人身安全、设备安全和供电可靠性。

1 低压配电系统接地故障保护设计

核电厂低压配电系统一般采用TN制接地型式，中/低压变压器选用Dyn11干式配电变压器，中性点直接接地。TN系统接地故障保护可以通过以下方式实现^[4-7]。

在变压器低压侧中性点上装设零序电流互感器，利用零序过电流保护实现接地故障保护，此时应满足如下关系

$$I_{\text{set}0} \geq K_{\text{rel}} I_{\text{unb}} / n_{a0} \quad (1)$$

$$K_{\text{sen}} \geq I_k / (I_{\text{set}0} n_{a0}) \quad (2)$$

式中， $I_{\text{set}0}$ 为零序过电流保护整定值，A； I_k 为最小接地故障电流，A； K_{rel} 为零序过电流保护可靠系数，取1.3~1.5； I_{unb} 为变压器最大负荷的不平衡电流一次值，A，取0.2~0.5 I_E ； I_E 为变压器低压侧一次额定电流； K_{sen} 为零序过电流保护灵敏系数，不小于2； n_{a0} 为零序电流互感器电流比。

变压器中性点零序过电流保护动作电流与下一级零序过电流保护或相电流保护配合时，应满足如下关系

$$I_{\text{set}0} \geq K_{\text{co}} I_{\text{set}4.\text{max}} / n_{a0} \quad (3)$$

$$I_{\text{set}0} \geq K_{\text{co}} I_{\text{set}3.\text{max}} / n_{a0} \quad (4)$$

式中， $I_{\text{set}4.\text{max}}$ 为下一级零序过电流保护最大动作电流一次值，A； K_{co} 为保护配合系数，不小于1.15； $I_{\text{set}3.\text{max}}$ 为下一级相电流保护最大动作电流一次值，A。

变压器中性点零序过电流保护动作时间与下一级零序过电流保护或相电流保护配合时，应满足如下关系

$$t_{\text{set}0} \geq t_{0\text{max}} + \Delta t \quad (5)$$

式中， $t_{\text{set}0}$ 为变压器低压侧中性点零序过电流保护动作时间，s； $t_{0\text{max}}$ 为下一级零序过电流保护或相电流保护最长动作时间，s； Δt 为保护级差时间，不小于0.2 s。

采用熔断器、断路器瞬时脱扣器的过电流保护兼做接地故障保护，此时应满足如下关系

$$I_k \geq K_d I_{\text{set}3} \quad (6)$$

$$I_k \geq K_r I_r \quad (7)$$

式中， K_d 为断路器过电流保护灵敏系数，不小于1.3； $I_{\text{set}3}$ 为断路器的瞬时过电流脱扣器的整定电流，A； K_r 为保证熔断器的熔体在规定时间内熔断的电流倍数； I_r 为熔断器的熔体额定电流，A。

对于线路末端，当过电流保护及零序过电流保护无法满足接地故障保护配合灵敏度要求时，可采用专用接地故障保护措施，如剩余电流(RCD)保护。采用RCD保护时，其保护配合应满足规范中的选择性要求，动作电流的整定计算应满足如下关系

$$I_{\text{set}4} \leq \frac{50}{R_A} \quad (8)$$

$$I_{\text{set}4} \geq K_{\text{seo}} I_l \quad (9)$$

$$I_k \geq K_s I_{\text{set}4} \quad (10)$$

式中， $I_{\text{set}4}$ 为剩余电流保护动作整定值，A； R_A 为外露可导电部分的接地极电阻和保护导体电阻之和， Ω ； K_{seo} 为泄漏电流保护配合系数，取2.5~4； I_l 为馈线回路正常运行时线路总的泄漏电流，A； K_s 为剩余电流保护配合系数，不小于5。

基于上述保护配置要求，形成典型保护配置图如图1所示。其中中压系统采用中性点不接地形式，线路设有相间短路保护及单相接地保护，变压器馈线设置有过电流保护及过负荷保护。低压系统具体接地故障保护典型配置方案如下。

1) 在低压厂用变压器中性点与接地系统的连接线上设置零序电流互感器，并配置接地故障继电器，通过零序电流保护实现对变压器出线及整组低压配电装置接地故障的保护。

2) 对额定功率为55 kW及以上的电动机回路、负荷为配电箱的馈线回路、移动或手持式电气设备和普通插座设置专用的接地故障保护。

3) 其他未配置专用接地故障保护的低压负荷，由低压配电盘抽屉内的熔断器或断路器的过电流保护兼做接地故障保护。

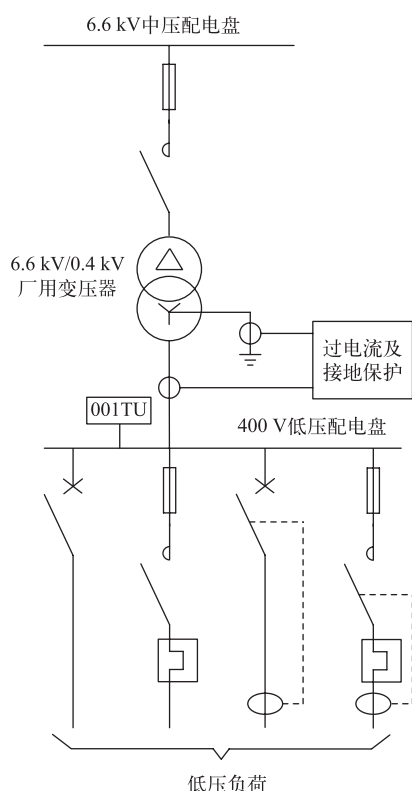


图1 核电厂低压配电系统保护配置图

Fig. 1 Protection configuration diagram of low voltage distribution system in nuclear power plant

2 典型事件及原因分析

2.1 典型事件

国内外核电厂低压配电系统曾发生过多起接地故障事件，其馈线回路过电流保护未及时动作，造成变压器低压侧中性点零序保护动作，导致为变压器回路供电的中压接触器越级跳闸，低压配电盘全盘断电，最终造成事故影响范围的扩大，事故记录见表1^[8]。

2.2 原因分析

根据表1中的统计结果，核电厂中发生接地故障并造成零序过电流保护越级动作的均是未配置专用接地故障保护的低压馈线回路。总结原因主要有以下几个方面。

1) 馈线回路发生非金属性接地，接地故障电流由于接触电阻的存在而变小。此时馈线回路过电流保护进入反时限特性，当上游零序过电流保护整定为定时限时，可能由于动作时间无法满足级差配合要求，导致中压馈线开关越级跳闸。

表1 核电厂低压配电系统接地故障事件记录

Tab. 1 Grounding fault event record of low-voltage distribution system in nuclear power plant

序号	时间	地点	事故描述
事件1	2009年2月	法国 CHOOZ 核电站2号机组 - 核岛	加热器 2DVC105RS 绝缘故障，低压回路过电流保护未及时动作，造成低压厂用变压器中性点零序保护越级动作，导致低压配电盘 2LLA001TB 全盘失电
事件2	2014年7月	国内某核电厂 - 核岛	电加热器 1DVN017RS 因C相接触不良而发热烧熔，引起接地故障。低压回路过电流保护未及时动作，造成低压厂用变压器零序保护越级动作，导致低压配电盘 1LLC001TB 全盘失电
事件3	2016年12月	国内某核电厂 - 常规岛	电动机 1SEO203MO 发生接地故障，低压负荷回路过电流保护未动作，造成低压厂用变压器零序保护越级动作，导致低压配电盘 1LKT001TB 全盘断电
事件4	2017年1月	国内某核电厂 - 核岛	冷却风机 1LHP215ZV 因绕组绝缘损坏，发生单相接地故障。低压回路过电流保护未及时动作，造成低压厂用变压器零序保护越级动作，导致低压配电盘 1LLI001TB 全盘失电

2) 馈线回路开关容量选取过大，过电流保护动作电流可能大于接地故障时的短路电流，灵敏度系数无法满足保护配合要求。当接地故障电流超过上游零序过电流保护整定值时，可能导致中压馈线开关越级跳闸。

3) 低压负荷配电线路较长或电缆截面积较小时，接地故障电流较小，灵敏度系数无法满足

保护配合要求，可能无法实现与馈线开关过电流保护的配合。此时馈线回路过电流保护进入反时限特性，可能导致上游零序保护误动作。

3 设计改进

当核电厂低压厂用电系统馈线回路末端发生接地故障时，为了与相应回路过电流保护相配

合,在典型保护配置方案的基础上,提出以下设计改进措施。

1) 在定时限零序过电流保护的基础上增设反时限零序过电流保护。当馈线回路发生接地故障时,以过电流保护作为主保护,快速切断故障回路电源;以变压器中性点反时限零序过电流保护作为后备保护,切断变压器进线电源。通过低压保护继电器的反时限加定时限的两段式零序电流保护与馈线开关的合理配合,可有效防止未设置专用接地故障保护的低压负荷回路发生接地故障时开关越级跳闸,避免事故影响范围的扩大。

2) 合理选配馈线回路开关器件的规格型号。馈线回路应根据负荷特性(如躲过电动机的起电流),尽量选择规格型号合适的开关,使得在较大的接地故障电流时,馈线回路的过电流保护能够及时动作。避免因开关容量设计裕度过大,造成其动作电流无法满足兼做接地故障保护的灵敏度要求。

3) 提高馈线回路末端的接地故障电流值。对于距离变压器较远,末端接地故障电流偏小的用电设备,此时按相间短路配置的过电流保护可能已不满足接地故障时快速切断电源的要求。

可以考虑增大馈线回路电缆芯线截面积,增加保护接地导体截面积,合理规划电缆敷设路径以控制电缆长度在有效范围内等措施提高接地故障电流,同时提高保护配合灵敏度。

4 工程应用

基于以上改进措施,完成国外某核电厂某子项目380 V低压配电系统(EET系统)接地故障保护的设计改进。EET系统共设置两组配电盘9EET001TB及9EET002TB,分别向重要及非重要负荷提供电源。正常情况下,9EET001TB由6.6 kV交流公用配电盘9ESHB001TB经低压厂用变压器9EET001TR向其供电。全厂失电工况下,9EET001TB由6.6 kV交流厂区附加电源配电盘9EMM001TB经低压厂用变压器9EET002TR向其供电。正常电源(9ESHB)与厂区附加电源(9EMS)至配电盘的进线开关201JA与202JA之间设机械联锁,避免同时给9EET001TB供电。EET系统接线原理图如图2所示。

基于上述接地故障保护的典型配置方案,形成EET系统变压器及部分典型馈线回路开关配置表,具体见表2。

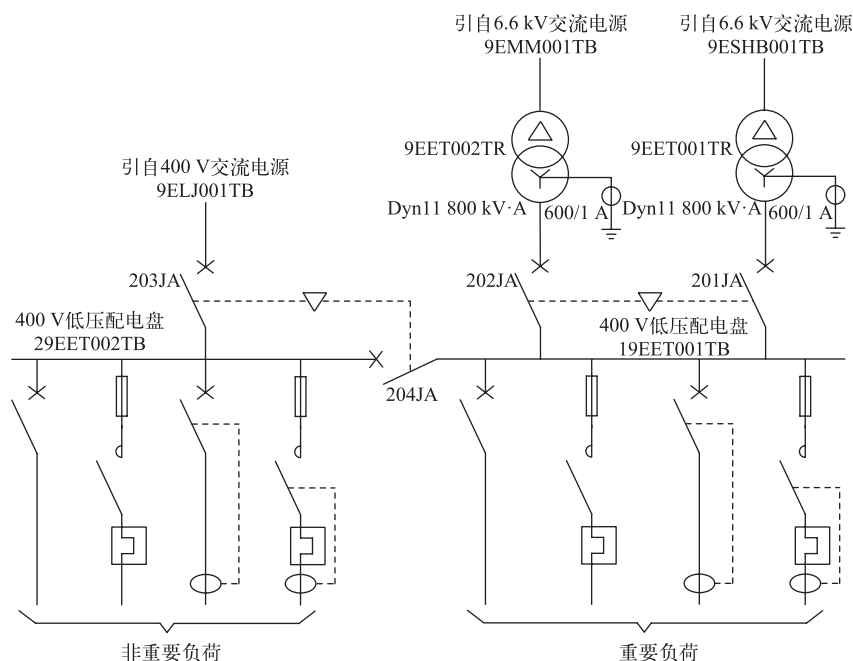


图2 EET系统接线原理图

Fig. 2 EET system wiring schematic diagram

表2 9EET001TB 典型低压负荷馈线
Tab. 2 9EET001TB typical low-voltage load feeder

序号	设备编号	负荷名称	额定功率/kW	额定电流/A	电缆规格/mm	电缆长度/m	断路器型号	接触器型号	热继电器型号	零序保护继电器型号	RCD 继电器型号
1	9EET001TR	低压厂用变压器	800	1 155	—	—	—	—	—	SPAJ142C LMZJ1 800/1	—
2	9EMS301MO	预热水泵电动机	0.75	2.08	3×2.5	61.6	NSX100F-MA2.5	LC1-D09	LRD-07C	—	—
3	9EMS900RE	发电机空间加热器	1.89	2.9	3×2.5	35.5	NSX100F-MA6.3	LC1-D09	LRD-08C	—	—
4	9EMS101MO	燃油输送泵电动机	2.2	5	3×2.5	89.6	NSX100F-MA6.3	LC1-D09	LRD-10C	—	—
5	9EMS104MO	燃油增压泵电动机	4	9.9	3×2.5	46	NSX100F-MA12.5	LC1-D18	LRD-16C	—	—
6	9EMS202MO	滑油预供泵电动机	15	37	3×16	56.1	NSX100F-MA50	LC1-D50A	LRD-350C	—	—
7	9VZD101ZV	屋顶通风机	22	44	3×16	36.3	NSX100F-MA100	LC1-D65A	LRD-3359C	—	—
8	9ECT001RD	48 V 直流充电器	13.0	21.5	3×16	22.5	NSX100F-TMD32	—	—	—	—
9	9EDT001RD	110 V 直流充电器	29.9	49	3×16	27.5	NSX100F-TMD63	—	—	—	—
10	9VZD001CI	分体柜式空调插座	7.2	12.2	4×4	40.9	NSX100F-TMD16	—	—	—	RESYS M40 △ IC Φ 30
11	9LEY001AR	应急照明配电盘	6	11.4	4×4	19	NSX100F-TMD16	—	—	—	RESYS M40 △ IC Φ 50
12	9EMS420AR	压缩空气单元 A	24	42	4×16	46.1	NSX100F-TMD50	—	—	—	RESYS M40 △ IC Φ 50

对于变压器出线及低压盘的接地故障,利用保护继电器SPAJ142C中SPCJ4D29模块的II段定时限零序电流保护 $I_{0>>}$ 作为主保护。利用SPCJ4D29模块中的I段甚反时限零序电流保护 $I_{0>}$ 作为低压负荷单相接地故障的后备保护。由于核电厂低压厂用电系统中未配置专用接地故障保护的电动机功率为45 kW,因此按45 kW电动机回路的开关选型进行零序过电流保护的级差配合。EET系统下游45 kW电动机回路选用断路器型号为NSX100F-MA100,热继电器型号为LRD3365C。根据NSX100F-MA100的特性曲线,断路器磁脱扣最大整定值为1 400 A,脱扣时间约为20 ms。为满足保护配合要求,确认零序保护II段定时限电流整定值 $I_{0>>}$ 为2 400 A,延时0.5 s。根据LRD3365C的特性曲线,为满足保护配合要求,选取SPCJ 4D29的甚反时限保

护特性,时间系数取0.8。确认零序保护I段反时限电流整定值 $I_{0>}$ 为560 A。最终形成配合曲线如图3所示。

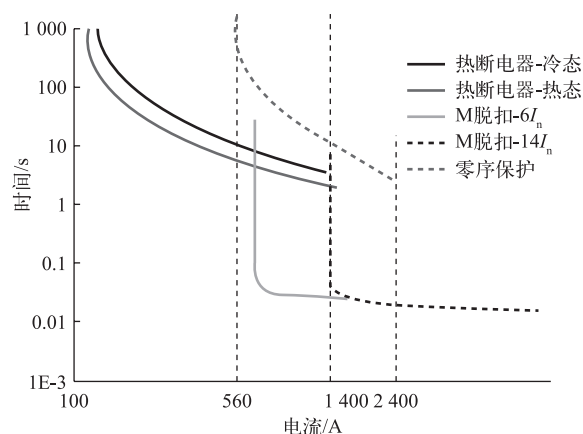


图3 反时限加定时限保护配合曲线

Fig. 3 Inverse time limit plus definite time limit protection coordination curve

对于未设置专用接地保护装置的低压馈线回路,利用过电流保护兼做接地故障保护。此时开关容量、保护定值、电缆规格和电缆敷设路径应该综合考虑并合理配置,保证发生接地故障时,过电流保护灵敏系数满足规范要求。

对于典型设计中需设置专用接地保护装置的低压馈线回路,以及保护配合灵敏度不满足要

求,需要增设专用接地故障保护装置的回路,利用RESYSM40漏电保护继电器实现接地故障保护,最大整定电流为30 A。

根据式(1)~式(10),考虑变压器出线及每个馈线回路的接地故障电流,校验保护配合是否满足要求,形成接地故障保护校验表见表3。

表3 典型负荷接地故障保护校验

Tab. 3 Verification of typical load ground fault protection

序号	设备编号	负荷名称	接地故障电流 I_k/A	瞬时保护 I_{set3}/A	零序保护		RCD 保护		保护校验			
					I_{set0}/A	t_{set0}/s	I_{set4}/mA	t_{set4}/s	k_d	k_{sen}	$k_{co.0}$	k_s
1	9EET001TR	低压厂用变压器	15 650	—	$I_{\infty}=560$ $I_{0>>}=2\ 400$	甚反时限 0.5 s	—	—	—	6.5	—	—
2	9EMS301MO	预热水泵电动机	129	25	—	—	—	—	5.18	—	—	—
3	9EMS900RE	发电机空间加热器	225	63	—	—	—	—	3.56	—	—	—
4	9EMS101MO	燃油输送泵电动机	89	37.8	—	—	—	—	2.35	—	—	—
5	9EMS104MO	燃油增压泵电动机	173	100	—	—	—	—	1.73	—	—	—
6	9EMS202MO	滑油预供泵电动机	909	500	—	—	—	—	1.82	—	—	—
7	9VZD101ZV	屋顶通风机	1 405	800	—	—	—	—	1.76	—	—	—
8	9ECT001RD	48 V 直流充电器	2 267	400	—	—	—	—	5.67	—	—	—
9	9EDT001RD	110 V 直流充电器	1 855	500	—	—	—	—	3.71	—	—	—
10	9VZD001CI	分体柜式空调插座	312	190	—	—	30	0	1.64	—	18 666	10 400
11	9LEY001AR	应急照明配电盘	671	190	—	—	300	0.3	3.53	—	1 866	2 236
12	9EMS420AR	压缩空气单元 A	1 107	500	—	—	300	0.3	2.21	—	1 866	3 690

根据表3中计算结果可知:

1) 变压器中性点零序过电流保护动作电流应躲过变压器中性点上流过的最大不平衡电流,满足式(1)的要求。

EET系统采用Dyn11型式变压器,取最大不平衡电流为额定电流的35%,即404 A。变压器中性点最小零序保护动作电流为560 A,满足要求。

2) 变压器低压侧发生短路故障时,灵敏度系数应满足式(2)的要求。低压厂用变压器低压侧发生单相接地故障时,短路电流为15.65 kA,最大动作电流为2 400 A, K_{sen} 为6.5,大于2,满足要求。

3) 低压厂用变压器零序保护与带专用接地故障保护的下游回路配合时,灵敏系数应满足式

(3)及式(4)的要求。低压负荷RCD保护最大整定值为30 A,低压厂用变压器零序保护与之配合时, $K_{co.0}$ 为18.6,大于1.15,满足要求。

4) 未配置专用接地故障保护的馈线回路采用过电流保护兼做接地故障保护时,灵敏度系数应满足式(6)的要求。根据表3,馈线回路采用瞬时过电流保护兼做接地故障保护时,动作电流经过整定后,灵敏度系数最小为1.64,满足要求。

5) 低压厂用变压器零序保护与不带专用接地故障保护的下游回路配合时,动作电流及时间应满足式(4)~式(5)的配合要求。从图3保护配合 $I-t$ 特性曲线可以看出,当故障电流小于1 400 A时,热继电器先于零序保护动作,在一定时间内动作切断电源。当故障电流不小于1 400 A

时,断路器先于零序保护动作,瞬时动作切断电源。从级差配合曲线可以看出,低压厂用变压器中性点两段式零序过电流保护 $I-t$ 特性曲线在热继电器-断路器特性曲线的上方,且任意故障电流下, $K_{co.3}$ 及 Δt 均满足要求。

6) 馈线回路装设RCD保护时,保护定值应满足式(8)~式(10)的要求。根据表3,馈线回路采用RCD保护时, K_s 满足式(10)的要求。为避免电气火灾而设计的RCD保护,其动作电流取300 mA。对于插座及户外移动设备而设计的RCD保护,动作电流取30 mA,均满足规范要求。

根据以上分析结果,说明EET系统接地故障保护的设计改进方案满足规范要求,同时有效减小了事故影响范围,实现了对子项目低压厂用电系统全供电范围内的接地故障保护。

5 结束语

本文根据规范要求及经验反馈,提出通过合理配置开关容量及保护定值、合理选择电缆规格及敷设路径,并采用变压器低压侧中性点反时限加定时限零序过电流保护的设计方案,实现对核电站低压配电系统全供电范围内的接地故障保护。同时避免了低压厂用变压器零序过电流保护越级动作导致的低压配电盘全盘失电的风险,有效地缩小了事故的影响范围,提高了核电厂电气

系统稳定性及可靠性,对后续工程的设计有一定的参考作用。

参考文献

- [1] 低压配电设计规范:GB 50054—2011[S].
- [2] 供配电系统设计规范:GB 50052—2009[S].
- [3] 张保会,尹项根.电力系统继电保护[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [4] 厂用电继电保护整定计算导则:DL/T 1502—2016[S].
- [5] 中国航空规划设计研究总院有限公司.工业与民用供配电设计手册(下册)[M].4版.北京:中国电力出版社,2016.
- [6] 建筑物电气装置 第5部分:电气设备的选择和安装:GB 16895.4—1997[S].
- [7] 低压电气装置 第4-41部分:安全防护 电击防护:GB 16895.21—2020[S].
- [8] 宋鹏飞.核电站低压厂用变压器零序保护的分析与改进[J].核科学与工程,2016(4):245-250.

作者简介

盛龙(1988—),男,高级工程师,主要研究方向为核电厂厂用电系统研究与设计。

(收稿日期:2022-06-11)

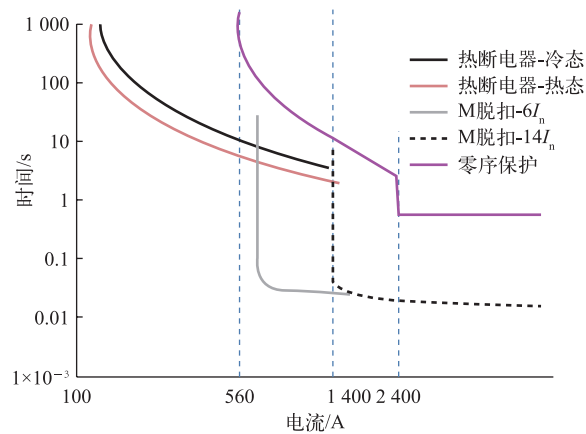


图 3 反时限加定时限保护配合曲线

Fig. 3 Inverse time limit plus definite time limit protection coordination curve

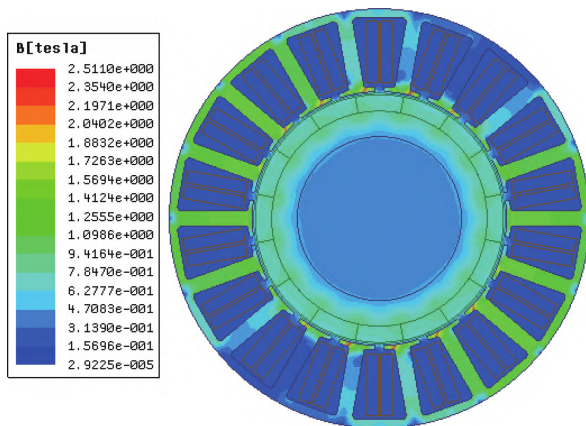


图 7 额定负载下磁密分布图

Fig. 7 Magnetic density distribution under rated load