

基于ETAP软件在炼化企业异步发电的应用研究

董东来

(中石油吉林化工工程有限公司, 吉林 吉林 132002)

摘要: 鉴于炼化企业中工况繁多, 经常存在余热蒸汽浪费的情况, 余热节能需求成为当下炼化企业节能的新研究方向。在余热节能利用中采用异步发电方式具有较好的适应性及方便接入现有配电系统等优势, 成为了众多节能方案中的一种合理选择。对异步发电在炼化企业的应用进行了深入的研究, 从异步发电机的发展及原理、潮流计算、发电机起动、短路电流计算、断路器选择和二次保护等方面进行了详尽的应用研究。

关键词: 异步发电机; 短路电流计算; ETAP

Research on the application asynchronous power generation based on ETAP software in refining and chemical enterprises

DONG Donglai

(China Petroleum JiLin Chemical Engineering Co., Ltd., Jilin 132002, China)

Abstract: In view of the various working conditions in refining and chemical enterprises, and the waste of waste heat steam, the demand for waste heat energy conservation has become a new energy conservation research direction in refining and chemical enterprises. In the energy-saving utilization of waste heat, asynchronous power generation has the advantages of good adaptability and convenient access to the existing distribution system, which has become a reasonable choice among many energy-saving schemes. In this paper, the application of asynchronous power generation in refining and chemical enterprises is deeply studied, and a detailed application research on the development and principle of asynchronous generator, power flow calculation, generator startup, short-circuit current calculation, circuit breaker selection, secondary protection and so on is made.

Key words: asynchronous generator; short circuit current calculation; ETAP

0 引言

炼化企业中不同品质的蒸汽需要量大、工况变化多, 在不同工况下对于蒸汽的需求也不同, 且长期存在一定量的余热蒸汽浪费的情况。在余热利用中, 国内常用的方式分为热交换、热功转换和余热制冷制热等方式, 对于炼化企业采用热

功转换中的拖动泵类的方式较为普遍, 但对于波动范围较大且余热量不大的企业来说, 异步发电因其具有较宽的适应性、方便接入现有配电系统及对现有装置运行影响小等优势成为了较好的解决方案。

关于异步发电机在炼化企业的应用研究却

较少，主要是因为炼化企业有着特殊的环境特征——爆炸危险区域较多，因此炼化企业也仅在安全区内开始少数应用，但随着防爆异步发电机的成熟，在防爆危险场所也得到了一定的应用。在我国节能减排的需求日益显著的情况下，众多炼化企业也十分重视工艺装置的节能技术改造，降低能耗、物耗，提高经济效益。在炼化企业的装置中，蒸汽动力系统是重要组成部分，所有的工艺过程都需要蒸汽和电力等公用工程的连续供应，然而提供这些公用工程需要耗费大量的投资和运行费用。蒸汽动力系统及其与工艺系统的集成优化，节能潜力占整个炼化企业的10%以上，而随着企业的不断发展，为了满足生产需要，改扩建过程中蒸汽系统经常出现利用不完善、部分减温减压及放空等问题。将原工艺的压差能量提取并转换为做功动力，拖动异步发电机发电，再将发电并入企业内部电网以节省等量外购电，从而衍生可观的节能效益。比如华北某炼化企业采取上述方案后，设置了两台2 000 kW异步发电机。可衍生净发电功率2 950 kW，按照年运行8 400 h计，年节电量可达1 982万kW·h，按该企业目前执行的峰谷电价平均值0.8元/(kW·h)计算，可每年节约电费1 585.92万元。有可观的经济效益，异步发电机在炼化企业的应用研究显得很有必要。

本文所采用的ETAP计算软件是全球电气工程应用领域公认的大型计算软件，该软件是可提供电力系统分析、设计和仿真等功能的优秀计算软件，可完成电力系统的短路电流计算和整定保护的校验，在计算中可以选择IEC标准或ANSI标准，本文根据项目需求选用了IEC标准进行仿真和工程应用。

1 异步发电机发电原理

异步电机既可作为电动机运行，又可作为发电机运行，即异步电机的电动机运行状态和发电机运行状态可逆。

1.1 异步电动机原理

异步电动机的等效电路如图1所示。

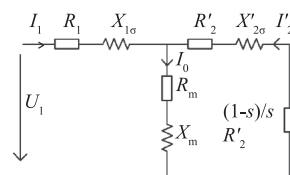


图1 异步电动机的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of asynchronous motor

异步电动机等效公式为

$$U_1 = -E_1 + I_1 Z_1 \quad (1)$$

式中， U_1 为电动机定子电压； E_1 为定子绕组中的感应电动势； I_1 为电动机定子电流； Z_1 为定子绕组相漏阻抗。

异步电动机的 $n < n_0$ ，即电动机转速 n 小于同步转速 n_0 ，转差率为正值，即 $s = (n_0 - n) / n_0$ 。

1.2 异步发电机发电原理

将异步电动机定子三相绕组接入电压、频率恒定的电网时，若用原动机把异步电动机转子拖到超过同步转速，即 $n > n_0$ ，转差率为负值，则异步电动机进入发电机状态。来自原动机的机械功率在扣除各种损耗后，转换成电功率送给电网，将机械能转换为电能。

异步发电机数学机端电压变换为

$$U_1 = E_1 - I_1 Z_1 \quad (2)$$

对于自励异步发电机机端电压的建立是其稳定运行的基础，起动时所需的电容值是发电机电压建立的关键。由于自励异步发电机自身存在带负载能力差的缺点，需要电容并联补偿的方法来稳定机端电压，以提高其负载能力。

2 炼化企业异步发电机应用优势简介

炼化企业爆炸危险区域较多，危险区域内危险气体种类繁多，各类容器、泵、压缩机、阀门、法兰、连接件、安全阀和排气孔等位置根据工艺运行工况有释放可燃气体的可能性，所以防爆设计对于炼化企业安全运行是至关重要的。

这也是给在危险区域内设置发电机提出了防爆要求。由于防爆异步电动机在炼化企业应用很普遍，这样为防爆型异步发电机的应用提供了有效的技术支撑。异步发电机因无须设置同步发电机的励磁系统，在危险区域的现场设备相对较

少，操作相对简单，无须设置同期装置等优势，为异步发电机在炼化企业中的广泛应用创造了有利条件。

3 异步发电机应用的几点研究

因余热发电以改造项目为主，对于电气专业起初的研究就要考虑建设在炼化企业现有装置内，故需综合考虑可接入的变电所或开闭所的实际情况。如何更好地结合现有情况，实现接入并保证平稳运行，从如下几个方向进行研究。

3.1 异步发电机基本参数

异步发电机的基本技术参数情况如表1所示。

表 1 异步发电机参数
Tab. 1 Parameters of asynchronous generator

功率 /kW	电压 /kV	效率	功率因数	最大转矩 / 额定转矩	堵转转矩 / 额定转矩
2000	6.6	96.1	0.9	2	0.7
堵转转矩 / 额定转矩	额定电流 /A	同步转速 / (r/min)	电动机转动惯量 / (kgm ²)	净负荷 /kN	动负荷 /kN
7	202.3	3 000	56	24.01	12.79

3.2 异步发电机潮流和短路研究

为更好地研究异步电动机接入电力系统，通过ETAP软件建立了软件模型，并分别进行潮流分析和短路电流计算。建模情况如图2所示。

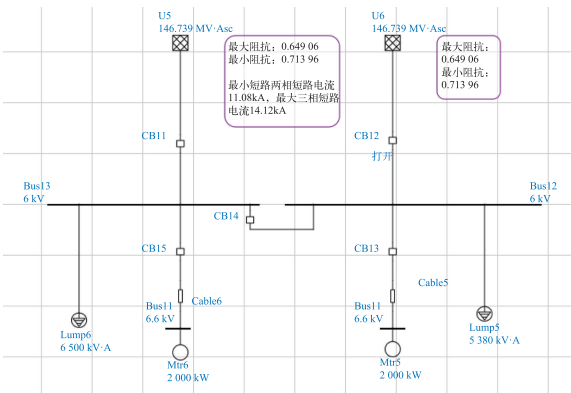


图 2 ETAP 软件单线图

Fig. 2 Single line diagram of ETAP

异步发电机的潮流分析能够更好地研究其对电网的影响。

ETAP潮流分析情况如表2和图3所示。

表 2 ETAP 潮流分析报告

Tab. 2 Power flow analysis report of ETAP

母线名称	电压		发电		负荷	
	kV	角度	MW	Mvar	MW	Mvar
Bus12	6	0.0	0	0	5.38	0
Bus13	6	0.0	7.9	2.331	6.50	0
Bus11	6.01	0.2	2.0	- 1.16	0	0
Bus14	6.01	0.2	2.0	- 1.16	0	0

潮流				
名称	MW	Mvar	A	%PF
Bus12	3.390	1.166	345.0	94.6
Bus13	- 3.390	- 1.166	345.0	94.6
Bus11	- 1.990	1.166	221.9	- 86.3
Bus14	- 1.990	1.166	221.9	- 86.3

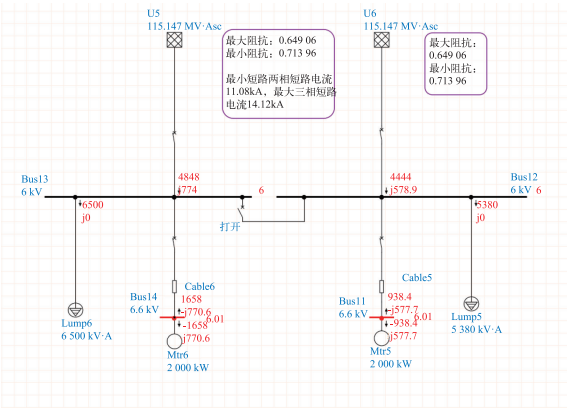


图 3 ETAP 软件潮流分析

Fig. 3 Power flow analysis of ETAP

另外，异步发电机的短路分析是能够更好保证一次设备的选择和保证异步发电机可靠接入现有系统的前提。根据IEC标准，在计算最大短路电流时，必须考虑高压电动机的影响。故经调研后，现有变电所内I段电动机总容量为6 500 kV·A，II段电动机总容量为5 380 kV·A；该变电所短路阻抗（即最大运行方式阻抗）为0.649 06。现有系统的技术参数收集后，通过软件进行分析研究，短路分析情况如表3和图4所示。

表3中从现有变电所母线、接入的异步发电机端和发电负荷情况等按照0.01~0.06 s进行了详细的分析计算，通过上述计算不难看出，I_b在0.01 s时最大，仅为24.138 kA。

表 3 ETAP 短路分析报告

Tab. 3 Short-circuit analysis report of ETAP

变电所 母线	电压 (6 kV)		发电		负荷	
名称	(%)	角度	MW	Mvar	MW	Mvar
Bus12	100.000	0.0	0	0	5.38	0
Bus13	100.000	0.0	7.9	2.331	6.50	0
Bus11	91.146	0.2	2.0	-1.16	0	0
Bus14	91.146	0.2	2.0	-1.16	0	0

开断和直流故障电流 /kA 基于总的母线故障电流 (6 kV 主母线)			
TD/s	I_b 对称	I_b 不对称	I_{dc}
0.01	24.138	35.169	25.578
0.02	23.777	30.108	18.470
0.03	23.393	26.936	13.353
0.04	22.883	24.841	9.664
0.05	22.272	23.346	7.001
0.06	21.800	22.383	5.077

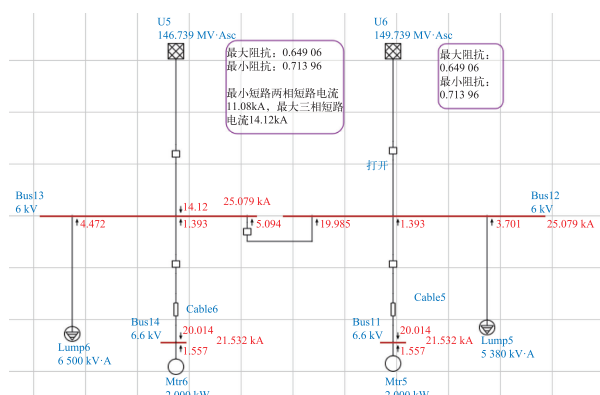


图 4 ETAP 软件短路计算

Fig. 4 Short-circuit current calculation of ETAP

经采用 ETAP 软件短路电流计算, 6 kV 母线短路电流 $I_k^* = 25.8$ kA。

3.3 异步发电机的起停仿真

经过仿真计算, 在异步发电机并网时可满足母线压降要求, 如表 4 和图 5 ~ 图 8 所示。

表 4 ETAP 启动报告

Tab. 4 Starting analysis report of ETAP

母线	电压 (%)	开始时间 /s	持续时间 /s
Bus13	90.6	1	4.48
Bus14	80.6	1	4.48

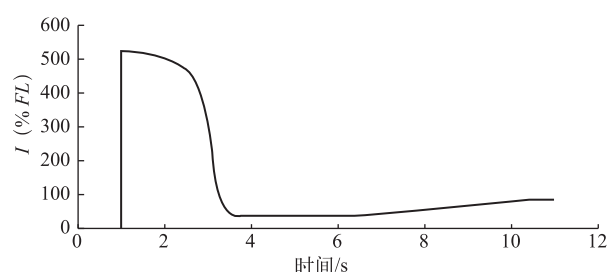


图 5 ETAP 异步发电机机端电流仿真

Fig. 5 Asynchronous motor terminal current simulation of ETAP

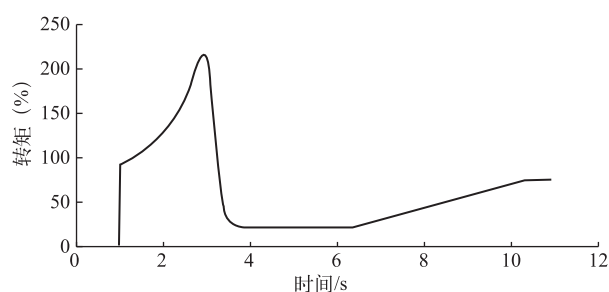


图 6 ETAP 异步发电机转矩仿真

Fig. 6 Asynchronous motor torque simulation of ETAP

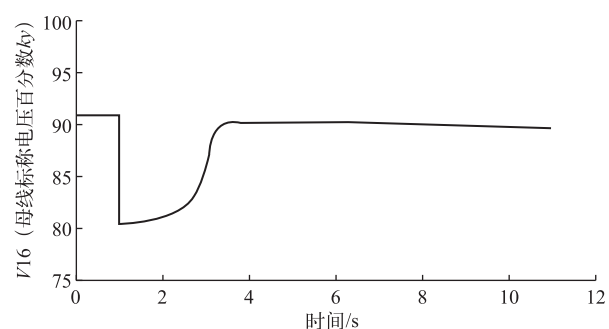


图 7 ETAP 母线电压仿真

Fig. 7 Bus voltage simulation of ETAP

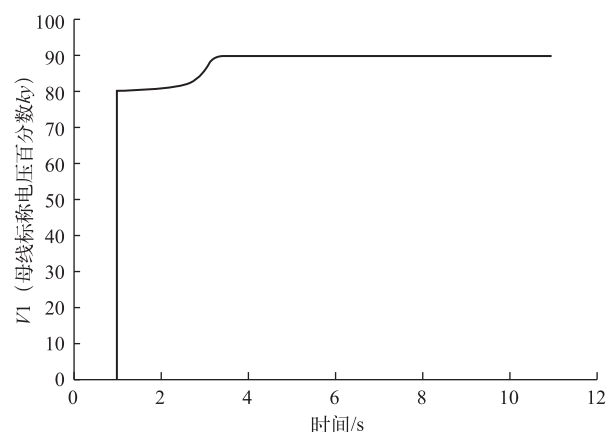


图 8 ETAP 异步发电机终端电压仿真

Fig. 8 Asynchronous motor terminal voltage simulation of ETAP

3.4 异步发电机接入断路器的研究

根据短路电流计算,开展接入系统的电气设备选择研究,核心就是接入断路器,其参数如表5所示。下面针对其进行分析研究。

表5 断路器参数

Tab. 5 Parameters of circuit breaker

分闸时间 /ms		开断时间 /ms	合闸时间 /ms	燃弧时间 /ms
分闸线圈 (Y1)	二级脱扣器 (Y2.Y4.Y7)			
40 ~ 60	30 ~ 50	< 75	≤ 75	< 15
额定短路 关合电流 /kA	额定短路 开断电流 /kA	热稳定 时间 /s	额定工频耐受 电压 (对地 / 断口) /V	额定工频耐 受电压 (对 地 / 断口) /V
63	25	4	42/48	75/85
80	31.5	4	42/48	75/85

对于异步发电机的接入断路器选择的重点条件需要考虑短路电流分断能力,其中直流分断能力容易被忽视。

按《导体和电气选择设计技术规定》中关于断路器直流分断能力的有关要求,结合西门子断路器3AH5型的技术参数,详细计算如下:若选择1 250 A/31.5 kA的断路器直流开断能力为45%,故 $31.5 \text{ kA} \times 0.45 \times \sqrt{2} = 14.175 \text{ kA}$,则其直流分断能力为14.175 kA。另根据业主继电保护的试验结果和综合保护器的样本资料,保护器瞬动指令发出时间为30 ms,按照30 ms时经过6 kV异步发电机断路器的最大短路直流分量为13.353 kA。经上述分析可知,该型号的断路器可满足短路分断的要求,可作为该异步发电机接入现有6 kV系统的断路器。

3.5 异步发电机二次保护的研究

异步发电机的保护不同于异步电动机的保护,有其自身的特点。

大于2 000 kW的异步发电机需设差动保护,本次选择了磁平衡差动保护,俗称小差动保护,接线原理如图9所示。

磁平衡纵差保护可灵敏反映定子绕组的相间短路故障,包含定子绕组对另外两相中性点短

路,不反映定子绕组的匝间短路和定子绕组的断相故障,就反映故障类型来说,与常规纵差保护无区别,但起动、外部短路故障的反馈电流、外部短路故障切除自动起动过程中不会形成不平衡电流,这与常规纵差保护不同。对外部单相接地故障来说,有不小的不平衡电流。

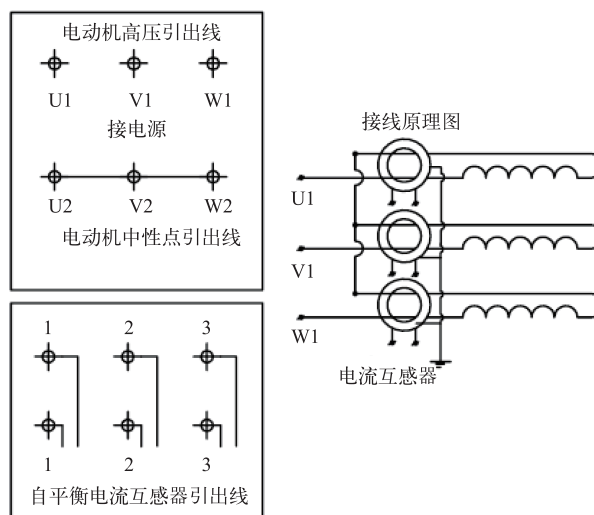


图9 异步发电机接线原理

Fig. 9 Asynchronous generator wiring principle

对于电动机来说,磁平衡差动保护性能远优于比率制动差动保护,其灵敏性也大为提高。

除磁平衡保护外,异步发电机还应装设电流保护、负序过电流保护、过负荷保护、零序过电流保护、低电压保护及逆功率保护,对供电电缆上的短路故障与异步发电机的故障进行保护。

为保证二次保护的可靠性,电流互感器的参数选定尤其重要。容量可选15~20 V·A,二次额定电流宜取1 A,一次额定电流宜取较大值,在保护最严重短路情况下不发生饱和。磁平衡差动一般为15%~20%的额定电流,针对本次2 000 kW异步发电机的额定电流为202.3 A,因此15%~20%的额定电流为30.3~40.4 A,故选择的互感器为50/1 A。

对于逆功率保护的设定,不能只按经验值进行,因在逆功率状态下,相当于异步发电机由发电状态改变为电动机低功率情况下运行,故需要结合拖动异步发电机的原动机的特性来综合

考虑。

关于异步发电机的继电保护部分如表6所示。

表6 异步发电机继电保护

Tab. 6 The relay protection of asynchronous generator

保护名称	整定值	备注
磁平衡保护	0.7 A	50/1
速断保护 (过电流 I 段)	6.1 A	300/1
负序过电流保护 (不平衡保护)	0.67 A (0.1 s) 0.31 (0.5 s)	负序过电流 I 段 负序过电流 II 段
过负荷保护	0.82 (2 s)	
单相接地保护	0.08 A (0.5 s)	
低电压保护	65 V (0.5 s)	
逆功率保护	- 20 kW (40 s) - 100 kW (延时 0.2 s) 闭锁 4 s	厂家提供原动机 可承受逆功率 40 kW, 10 s

3.6 异步发电机实际工作情况

现场运行参数如表7所示。

表7 异步发电机工作情况

Tab. 7 Operation of asynchronous generator

电流 /A	功率 /kW	视在功率 /kV·A	备注
30	18	108	空载试车
30	502	108	运行

该项目已平稳运行，为此炼化企业带来了良好的节能效益。

4 结束语

经过本次基于ETAP异步发电机在炼化企业的深入应用研究，成功应用于炼化企业，且已平稳运行，为异步发电机在炼化领域的应用积累了宝贵经验，对未来进一步拓展余热发电在炼化企业的应用也具备一定的指导意义。**EA**

参考文献

- [1] 水利电力部西北电力设计院. 电气工程电气设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [2] 覃岭, 林济铿, 戴赛, 等. 计及短路电流约束的机组组合问题[J]. 中国电机工程学报, 2016(22): 6049-6058.
- [3] 姚家祎. 高压电动机磁平衡差动保护[J]. 建筑电气, 2017(3): 29-32.
- [4] 董东来. 基于ETAP和EAP软件在煤矸石发电厂短路计算中的应用研究[J]. 电气时代, 2017(9): 91-95.
- [5] 李楠, 潘博闻, 赵小禹. 异步发电机的应用及启动过程的研究[J]. 东北电力技术, 2016, 37(8): 15-17.
- [6] 吴新振, 张阳, 李嘉. 三相异步发电机带单相负载稳态运行的负荷序网模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 156-161.
- [7] 杨顺昌. 异步发电机的应用与研究[J]. 电工技术杂志, 2003(3): 56-60.
- [8] 导体和电气选择设计技术规定: DL/T 5222—2005 [S].
- [9] 火力发电厂厂用电设计技术规程: DL/T 5153—2014 [S].
- [10] 中国航天工业规划研究院, 等. 工业与民用配电设计手册[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2016.

作者简介



董东来

董东来(1980—), 男, 高级工程师, 电气室副主任, 主要从事化工供配电及发电工程设计工作。

(收稿日期: 2021-09-15)