

7-12, 34

抽水蓄能电站的电气设备

——'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会论文综述(五)

方辉钦

(电力工业部电力自动化研究院 南京 210003)

TV743, 34

摘要 '94 抽水蓄能工程国际学术讨论会上有关抽水蓄能电站电气设备方面的论文,涉及电动发电机组的各种运行方式及其相互转换的方法;启动、停机等操作所需的有关设备、控制方法及适用的计算机监控系统;各种同期方法的比较;有关的继电保护设备;确定临界速度的计算方法;抽水蓄能机组的可变速运行特性等。除了基本的理论分析外,部分论文还结合具体的工程进行了分析。

关键词 抽水蓄能 水电站 电气设备 监控系统 继电保护 学术会议 综述

'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会关于电气设备的论文只有 6 篇,但涉及面甚广,有抽水蓄能电厂电动发电机组的微型计算机励磁系统,抽水蓄能电厂监控系统与保护的设计,开放系统在抽水蓄能电厂监控中的应用,大型抽水蓄能电厂高压同期方式的特点分析,抽水蓄能机组临界速度的计算方法,抽水蓄能机组可变速运行特性的分析,高次谐波的滤除方法,等等。作者分别来自科研、勘测设计、工程管理及制造厂家等单位。有些文章结合工程实际情况进行了讨论。本文对这一部分论文的有关情况作一介绍。

1 抽水蓄能机组的励磁系统

文献[1]介绍了电力自动化研究院开发的适用于大型水轮发电机的带微机调节器的静止励磁系统及其在抽水蓄能机组的应用。针对带有微机励磁调节器的静止励磁系统,以降压异步启动的抽水蓄能机组为例进行了讨论,并对传统的模拟调节器和新型调节器进行了对比。

文章提及的调节器采用双通道,每个通

道由 3 块模件板组成;一块为 16 位 CPU 的 iSBC86/05A 微机板;一块为模拟量及开关量的输入输出板;一块用于触发大功率晶闸管的脉冲放大器。为了保证晶闸管的有规律的触发,设有同步电路,利用同步电路产生的矩形波,可计算出端电压的频率。每个通道均可接一台显示终端(CRT)或一台 IBM-PC 便携机,用以显示机组运行和励磁信息以及调试时的输入命令等。当装置给电时,或按复位按钮后就进入引导程序,实现发电机励磁调节。应用程序分为主程序及中断服务程序。主程序包括初始化、机组运行方式判别、启动条件判别以及开放中断、自诊断、励磁参数信息显示和命令接收等。主程序的执行采用无限循环方式,主要调节控制程序由中断服务程序实现,包括几乎所有励磁的应用程序。在工频 50Hz 时,中断服务程序每秒执行 300 次,它包括了发电机或电动机的正常运行和各种异常运行的程序,以及各种限制及保护功能。现以发电机正常调节程序为例,说明如下。

a. 通过模数转换器采集发电机端电压、

电流及励磁电流等交流量,计算发电机电压 U , 电流 I , 有功功率 P , 无功功率 Q , 励磁电流 I_f 及频率 f 等;

- b. 采集电压或励磁电流或无功给定值;
- c. 无功电流补偿计算及 PID 调节计算;
- d. 检查晶闸管功率柜等是否有故障,用以决定是否要限制发电机的出力;
- e. 检查发电机各电气量是否越限,如有,则设置相应的标志;
- f. 输出触发脉冲,并退出中断。

文献[1]还讨论了全压或降压异步启动,背靠背同步启动,用同轴线绕式异步电动机启动及用静止变频器启动。

异步启动比较简单,其缺点是对电网冲击大,对机组本身也不利,适用于容量不大的机组。

背靠背同步启动方式适用于有两台以上机组的抽水蓄能电站,一台机组作为发电机启动,其定子绕组连到另一台作为电动机启动的机组定子上,带动后者启动。此种方式的控制操作稍复杂,但仍不失为一种基本启动方式。

同轴电动机启动方法比较简单,但需增加机组和厂房高度。利用静止变频器启动,启动过程平稳迅速,是最理想的启动方法。但变频器要用到耐高压的大功率晶闸管(或大功率高压开关式元件),制造困难,价格昂贵,目前常采用高价的进口器件。研制国产器件及设备是发展我国抽水蓄能电站的关键之一。

2 抽水蓄能电站的监控系统及保护装置

文献[2]介绍了抽水蓄能电站监控系统和保护的基本设计原理,以及天荒坪抽水蓄能电站相应设备的概况。天荒坪工程是中国目前三个在建的抽水蓄能项目中,容量最大、技术参数最复杂的一个。机组启动和停机非常频繁,运行方式很多,为了保证该站安全经

济地运行,监控系统应具有如下功能:①设备状态监视,数据采集、处理和存储;②满足正常和事故、自动和手动的控制和调节要求;③实现电厂经济运行和设备的最佳控制;④电厂设备的安全监视及报警、事件顺序记录等;⑤先进的人机界面的应用;⑥电厂监控系统的在线自诊断及良好的容错能力;⑦提供良好的兼容性能,能够方便地扩展现存的系统。

考虑到抽水蓄能电厂控制的特殊性,并力求采用最新的技术,在天荒坪工程中采用了以计算机为基础的分层分布监视控制系统,带有分布式数据库。单独的控制设备,如调速器,电压调节器,静态频率转换器等都是数字式的,并可以通过串行接口与相应的当地控制单元 LCU 通信。

加拿大的 Bailey 公司中标,其 INFI-90 系统将用在天荒坪工程。调速器、电压调节器由机组制造厂提供。该监控系统中,机组控制级包括 10 台 LCU(图 1),通过多功能处理器,每个 LCU 都能实现智能控制。其中 1~6LCU 及 9LCU 采用冗余结构,用作发-变机组及 500kV 开关站设备的控制;8LCU, 10LCU, 11LCU 采用部分冗余的结构,其中 8LCU, 10LCU 分别供地下和地面辅助设备的控制之用,11LCU 用作上游水库有关设备的控制,监测水库水位,防止溢流,以保水库的安全。在 11LCU 与 INFI-90 之间既使用了光纤缆,也使用微波通道。电厂的水泵启动功能分散在各 LCU 中实现。还有两个可移动的监视站,可用来与就近的 LCU 连接,以便进行调试和检查。

电厂级计算机采用冗余结构,其功能常驻在不同的站,包括两个操作工作站、工程师工作站、打印记录站、厂长监视站等。由于采用分布方式,电厂级计算机站仅完成控制计算功能,诸如成组控制、经济运行等。事件顺序记录由 WESTRONIC 公司的 D20 系统构成,数据采集设备布置在 LCU,添加时间标

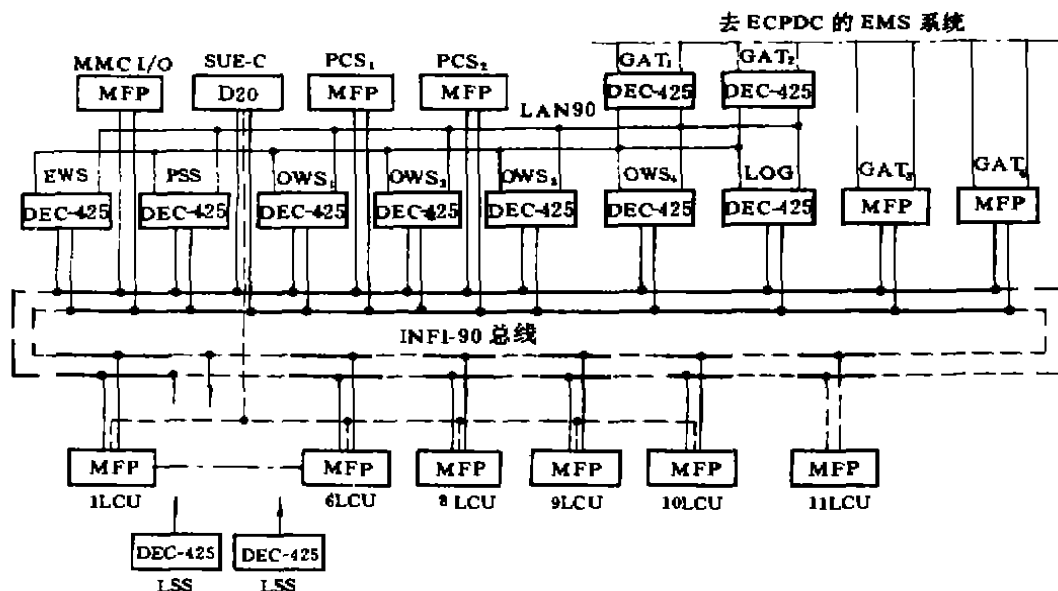


图1 天荒坪监控系统框图

记后, 传送给 SOE 中心, 供计算机系统显示、打印及存贮。该系统采用 POSIX 标准, 支持以太网和 ARC 网。LAN-90 使 INFI-90 系统有可能与其它的开放系统相连。天荒坪工程中的反相开关布置在电动发电机组与主变压器之间, 线路、母线及变压器保护与通常的水电厂没有区别, 当反相开关处在差动保护区时, 应考虑相位变化影响。对于抽水蓄能机组的保护, 还需考虑可逆式水泵水轮机的特性、运行方式变化引起的相位变化以及水泵启动时低频电流的影响。

对于水泵水轮机特性的影响, 主要考虑如下三方面: ①发电方式时的反向出力保护, 在发电机启动时, 实现从空载运行到反水泵区的保护。②频率保护, 特别是在水泵方式时, 水泵水轮机对频率比较敏感, 当频率偏移大于规定值时, 空蚀将变得很严重; 当频率偏移达到保护的设定值时, 频率保护将延时跳开机组。③在水泵方式下的低负荷保护, 当水泵工作受阻, 而阻力来自与水涡轮旋转方向相反的水流, 此时大轴与水涡轮都在不良的

条件下工作, 低出力保护即会动作, 它比低频继电器动作更灵敏。

关于相位变化的影响方面, 对于可逆机组, 发电方式与水泵方式的相序是不同的。它将影响差动继电器、带相位鉴别的继电器、与相位角相关的继电器等。天荒坪工程中除个别继电器外, 全部使用了数字式保护, 并使用软件来代替硬件以解决有关问题。

天荒坪工程使用静态频率变换器来实现水泵启动, 背靠背启动方式作为备用。不管何种方式, 一旦启动, 电动发电机组即投励磁。随着速度的变化, 发电机定子电流的频率和幅值也变化。在大多数模拟继电器中使用了电抗器及补偿器, 这将导致保护性能的欠缺。这就是为什么有时在频率低于 30~40Hz 时要闭锁保护的原因。

频率特性是继电器内涵的重要性能, 甚至对于数字式继电器, 频率特性也依赖其算法及采样周期, 因此必须特别注意, 投运前还要作专门的试验。有关问题尚待仔细地研究。

在天荒坪工程中, 保护系统与电厂监控

系统是完全独立的,它直接动作跳闸,但跳闸的信号会传送给电厂监控系统。当电厂监控系统退出工作时,要求机组仍能保持原来的工作状态。

3 应用开放系统的可行性分析

文献[3]分析了开放系统的特点和抽水蓄能电厂与一般水电厂的主要差别之后指出,对于抽水蓄能电厂,在开放环境下的计算机监控系统及能源管理系统技术上是可行的。

开放系统的主要特点是:①应用软件的可移植性。当用户要将系统升级,更新原有的计算机平台时,无需作任何修改,原来开发的软件即能在新的计算机系统使用,即保护了用户的软件资源;②可互操作性。一个网络可以连接不同类型的计算机或工作站,这对于扩展计算机系统,在网络上增加新的结点,在结点上配置各种不同的新型计算机是很有用的,可以实现分阶段的投资,因而保护了用户的硬件投资,并且能较容易地扩展系统以适应用户的新需求;③用户人机界面的通用性。在开放系统中,人机界面必须符合统一的标准,有经验的程序员能驾轻就熟地在新型计算机或工作站上操作而无需培训;④多窗口及高水平的画面设计。X 窗口/MOTIF 是开放系统人机界面的一种标准,在这种环境下画面的设计非常精致,交互式作图非常方便,而多窗口技术支持按操作员的要求显示多个窗口,如主窗口、事件窗口、控制窗口、帮助窗口等,为监视控制提供更强有力的工具。由于开放系统支持 TCP/IP 网络规约,很容易采用客户/服务器结构,构成分布式处理系统。此时在整个系统中,数据的处理及数据库都是分布式的。

从已投运的开放系统来看,具有高可靠性、高利用率、高性能的开放系统的优点可以归纳为:

a. 功能的分散布置。每个结点都可以赋予专门的功能,一个结点的故障只影响其本身,而其它结点仍能正常工作。

b. 每个当地控制结点的全冗余结构。所有子系统都设计成双系统,即在 P.T. 及 C.T. 以后,在输出继电器之前都采用全双的结构,而不仅仅只是双 CPU。其中之一维修时,另一路照样正常工作。

c. 整个系统的全冗余结构。如采用双网、双控制台以及双 LCU。任何一个设备故障都不会对系统的其余部分造成不良影响,中央控制室的控制台也一样。

d. 结点的独立性。每个结点的功能及控制对象都是独立的,非常适合于系统的分阶段投运。在分阶段投运中不需要任何的临时修改措施。

e. 节省各种不同规格的电缆。由于采用分布式系统及光纤网络,可以节省大量的控制电缆及信号电缆。另外也减小了传输信息的数量,所有的数据都是就近处理和存储,在以太网的通道上,没有“生数据”需要传送。

应该指出的是:在一般水电厂实现的所有功能,都可以在抽水蓄能电厂使用,如数据采集、事件顺序记录、趋势记录、控制、调节、历史数据累计、脉冲记数等等。而主要的不同点可以说是抽水蓄能电厂的顺序控制比较复杂。

抽水蓄能电站的运行方式比一般水电厂多,各种方式之间的转换类型也很多,在某些情况下操作也是非常复杂的。例如从停机备用到水泵运行方式,如果是充水启动,将会产生很强的振动,因此通常都是压水启动的,开机的过程包括:关闭导叶并下压尾水水位,使电动发电机组在水泵运转方向加速。此时机组作为电动机运行,并且消耗系统的功率最小。一旦机组以全速运转时,即准备好以水泵方式运行,此时开启导水叶,开始机组的抽水运行。虽然压水启动方式用得频繁,但其操

作比较复杂,启动的时间较长。当水头变化范围很大时,制造商还建议使用双速的水泵水轮机,当在低工作水头范围运行时,操作员必须以低速方式启动机组。

从水泵直接转发电的紧急操作方式,对保证电力系统的安全而言,是一个很重要的功能。这种操作也是很复杂的,常会导致设备的损坏。对于大型机组,最有效的办法是用电动开关。整个控制过程是:将水泵的转速减至零,然后将旋转方向转成相反的方向,水泵变成水轮机方式运行,再将水轮机加速,直至达到其额定转速。

新开发的一种顺控语言(SCL),可用来说明及执行上述控制流程。对于抽水蓄能电厂这样复杂的操作,完全可以由SCL来实现。文献[3]认为:SCL已经成功地用在大型水电厂的开放系统中,对于抽水蓄能电厂来说也是适用的。除了数据采集、事件顺序记录、趋势记录等功能外,其强有力的顺控功能完全能满足抽水蓄能电厂的需要。在开放环境下的计算机监控系统是实现抽水蓄能电厂监控的一个可行方案。

4 在高压侧同期的应用分析

抽水蓄能电站一般有两个同期点:一是在发电机侧的低压同期点;一是在主变侧的高压同期点。文献[4]说明了高压同期方法的特点及存在问题,由此得出高压同期方法的使用范围及经济上的特点。与低压侧同期方法相比,高压侧同期方法的特点有:①断路器、倒相开关、起动用母线等均不放在发电机侧,有关的土木结构及设备布置可以简化;②厂用电源及启动电源是取自高压侧,提供了完全可靠的故障测量及保护措施,但是电源变压器及开关设备的投资要增加;③当主变故障时,高压侧开关及发电机磁场开关跳闸,因而延长了故障电流的迟延时间,有时甚至会扩大变压器的事故;④在水泵方式,不论是

使用静态频率转换器启动,或是背靠背启动,所需电源都是由厂用母线提供;⑤如果背靠背启动母线在发电机侧,该母线能与静态频率变换器启动母线共用,在启动回路中,断路器应设置成同步启动方式;⑥在水泵方式,启动电流将流向机组,同时也流向主变的低压侧绕组,后者有可能导致启动失效或主变过激励。

高压侧同期有以下三个特殊问题:

a. 去主变的分流电流问题。在水泵方式,启动的初始阶段,使用高压侧同期方式将导致对主变的充电。该电流是一种低频的间隙电流。如果去主变的电流过大,主变将产生磁饱和现象,并且发热。这时发电机的启动转矩将下降,甚至会导致启动失效。日本Toshiba公司等有这方面的处理经验,其方法是:在开机前的一刹那,励磁系统在反方向激励主变,或用计算机模拟器,设置合适的磁场电流值,机组即被平稳地加速,图2示出了磁场电流与可控硅输出电流的关系及其最佳的设定范围。由图可见,主变饱和几乎完全依赖于磁场电流,而与可控硅输出电流无关。

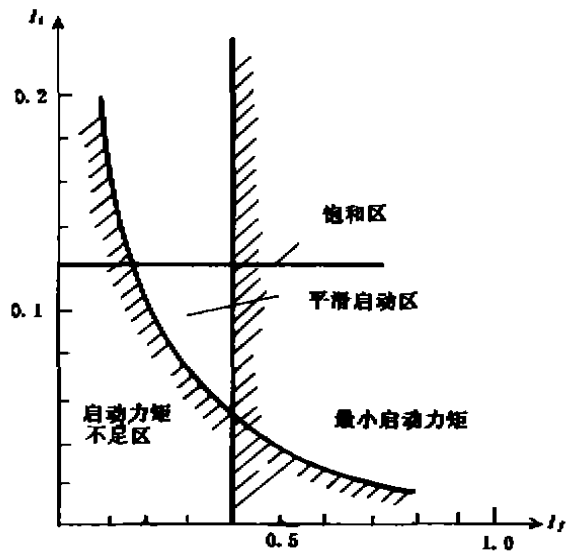


图2 磁场电流 I_f 与可控硅电流 I_t 的关系图

b. 厂用电流及启动电源问题。抽水蓄能电厂的厂用电容量约为电厂总装机的 0.5%~1.5%,而启动用电流容量约为机组容量的 5%~10%。根据计算,对于装机容量为 $4 \times 200\text{MW}$ 的电厂,其厂用和启动用变压器的容量为 $20 \sim 25\text{MVA}$;对于 $4 \times 30\text{MW}$ 的电厂,则为 $31.5 \sim 40\text{MVA}$ 。因为主回路中不设断路器,一般来说厂用及启动用电流来自高压侧。额定电压超过 110kV 的电力变压器的最小容量与电压等级有关。例如 220kV 变压器的最小容量是 $20 \sim 50\text{MVA}$, 275kV 变压器是 31.5MVA ,而 345kV 的变压器是 40MVA 。当该最小容量接近抽水蓄能电厂厂用及启动电源的容量时,高压厂用变压器将不会引起变压器容量的浪费。高压厂用电是直接取自电厂的高压母线,且具有完善的保护措施和高的可靠性。

c. 同步启动用总线的设置。由于目前常用静态频率转换器启动方式,背靠背启动方式作为备用。前者可利用率已很高,背靠背这种备用方式可进一步简化。也就是将任两台机组之间的背靠背启动方式改为一种固定的背靠背启动方式,其启动的逻辑关系能明显简化。当背靠背启动母线布置在发电机侧时,该母线可以与静态频率转换器母线共用,但需在线路中设置一个启动用断路器,用切换刀闸的方法共用一个开关,以便操作同期启动回路,并对其进行保护。

通过分析,文献[4]得出如下的结论:①在大型抽水蓄能电厂使用高压侧同期方法能够明显地减少厂房的土木工程量,以及简化电气设备的布置;②使用高压侧同期的方法已有 10 年的成熟运行经验,安全及可靠运行是能够得到保证的;③经济比较表明,当高压侧电压小于或等于 345kV 时,高压同步方式比较经济;而高压侧电压大于或等于 400kV

时,低压侧同期方式较经济。

5 临界速度的确定

文献[5]指出,每个意欲购买大型发电机或电动发电机组的用户,在其标书中都需要一个临界速度。所谓临界速度即避免机组的飞逸转速而考虑的某个安全裕度,一般在 15%~25%之间变化。由于临界速度缺乏公认的定义和相应的计算方法,因而差别可达一个相当大的百分比。

临界速度对应一个共振频率,此时速度与固有频率共振。对于无残留不平衡特性的线性系统,甚至只要一个很小的激励力量,引起的振动就会超出其限值,而最终将会损坏转轮。实际上轴承具有非线性特性,油膜和结构材料也具有不均匀性。振幅直接依赖于激励力量的大小,而固有频率的变化决定于外力、油膜的硬度、及幅度之间的非线性关系。引起振动的原因首先是质量的不平衡,其次是磁场力的不平衡,再就是由于过速而来自水轮机的力。

6 抽水蓄能机组的变速运转特性

潘家口抽水蓄能电厂在电动/发电机组与电力网之间使用了静态频率变换器(SFC),实现了可变速运行,可见抽水蓄能电厂的运行特性与一般的水轮发电机组是不同的。由于 SFC、电网与电动发电机组运行在不同的频率,SFC 仅传送有功功率,而不传送无功功率。SFC 还具有保护功能,可以限制 M 点与 N 点之间的短路电流。在马达运行方式时,SFC 可用作电动发电机组的启动设备。SFC 还可在停机操作时用作刹车,保护轴承。可变速运行需解决的问题包括:无功功率的补偿和滤除高次谐波等。

(下转第 24 页)

配有一定的监测力量进行定期监测,以掌握地下水水质污染动态,监测环境地质问题。

5.2 防止岩溶塌陷措施

a. 南京城区以山西路、南汽子弟小学、模范马路及化工学院、南京火车站一带为三叠系中、下统青龙群(T_{1-2})裂隙岩溶含水层。该地段为易塌陷和可能塌陷区,地下水仅适宜定量、分区开采,若集中、超量开采,将因岩溶真空吸蚀作用而导致地面塌陷或沉降。

b. 在埋藏型的岩溶发育区布井时,应尽量选择在上覆有40~60m以上的第四系盖层处,既可防止由于开采而在井群附近产生地面塌陷,又可利用上部盖层防止污染。

5.3 防止地下水污染措施

a. 全面规划、合理布局是保护地下水资源的重要对策。对南京地区几个水质较好的富水带,不能建设对地下水源有污染的公共设施 and 工厂。如对仙鹤门-东阳富水带、青龙

山-汤山富水带、江浦老山富水带等地区应加强保护。

b. 对已建厂严格执行“环保法”和“水污染防治法”,加强工矿企业三废排放治理,城市按功能分区进行总量控制,执行排污许可证制度。对新扩建企业执行环境影响评价制度,新建企业应坚持“三同时”的原则。

c. 根据《中华人民共和国水污染防治法》和《中华人民共和国水污染防治法实施细则》,结合南京市地下水环境实际情况,应制定相应的地方性法规。

参考文献

- 1 吴士良,方家骅等,江苏省地下水资源保护,南京:江苏省科学技术出版社,1991
- 2 酆桂芳,环境质量评价,北京:中国环境科学出版社,1989

(收稿日期:1994-05-26)

(上接第12页)

参考文献

- 1 Chen Xianming, et al. Microcomputer-based excitation system for motor/generator of pumped storage power stations. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 523~532
- 2 Chen Zhixing. The design of plant supervision control system and protection system for Tianhuangping Project. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 533~538
- 3 Fang Huiqin, Guo Maoqi, Wang Jun. Application of open system in monitor and control of pumped storage plant. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 539~543
- 4 Qiu Jingan. Features of high-voltage synchronizing connection for large-scale pumped storage plant. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 544~550
- 5 Walter SCHEIDL. Dynamic behaviour of rotors, with special considerations of the critical speed. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 551~561
- 6 Xing Yingjun. Discussion for variable speed operating characteristic of pump-storage hydro-unit and filtering out the higher harmonic in the electrical machinery in the Panjiakou. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 562~573

(收稿日期:1994-12-16)