

普朗铜矿生产地质取样方法

吴维虎^{1*}, 吴练荣², 沈啟武²

(1. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051; 2. 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 迪庆 674000)

摘要:普朗铜矿是近几年发现的超大型斑岩铜矿, 采用自然崩落法采矿。为提高生产效率, 在矿床地质特征基础上, 结合采矿工艺特点, 应用 X 荧光法、刻槽法、方格法、拣块法等不同取样方法, 通过样品化验品位误差分析, 进行了生产地质取样方法对比研究。在此基础上, 综合取样工作效率和经济效益, 得出各采样方法的优缺点和适应范围, 提出适合普朗铜矿不同情境下生产地质取样方法, 以更好地为矿山生产服务。

关键词:斑岩铜矿; X 荧光法; 刻槽法; 普朗铜矿

中图分类号:TD166 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)04-0062-06

Study of Geological Sampling Method for Production of Pulang Copper Mine

Wu Weihu¹, Wu Lianrong², Shen Qiwu²

(1. China Nonferrous Metals Industry Kunming Survey and Design Institute Co., Ltd., Kunming 650051, China;

2. Yunnan Diqing Nonferrous Metals Co., Ltd., Diqing 674000, China)

Abstract: As a very large porphyry copper mine discovered in recent years, the Pulang Copper Mine is mined by natural caving. In order to improve production efficiency, based on the geological characteristics of the deposit and combined with the characteristics of the mining process, different sampling methods such as X-ray method, groove-groove method, grid method and picking block method are applied to carry out the production geological sampling through sample test grade error analysis. On this basis, the comprehensive sampling efficiency and economic benefits are obtained, and the advantages and disadvantages of each sampling method and the scope of adaptation are proposed. The production geological sampling method suitable for different conditions of the Pulang Copper Mine is proposed to better serve the mine production.

Keywords: porphyry copper deposit; X-ray method; groove method; Pulang Copper Mine

普朗铜矿是近几年发现的超大型斑岩铜矿床, 目前已建成投产。矿山资源储量较大, 矿石品位低, 矿石物质成分简单, 铜矿物分布相对均匀^[1], 采用地下开采, 自然崩落法采矿。一期首采中段 3 720 m 以上矿体采用平硐开拓-胶带运输, 单中段回采连续崩落方案, 矿体最大崩落高度为 370 m, 平均崩落高度 200 m。首采中段设有 4 个主要水平, 从下至上分别为 3 660 m 有轨运输水平、3 700 m 回风水平、3 720 m 出矿水平、3 736 m 拉底水平。采场沿走向布置, 3 720 m 出矿穿脉间距 30 m, 3 736 m 拉底进路间距 13~17 m。设计开采矿石量 1.25×10^7 t/a, 出矿量达 3.8×10^4 t/d^[2]。普朗铜矿具有生产规模大, 采矿工艺先进, 生产管理复杂的特点。本次研究生产地质取样方法是更好的指导矿体圈定、采掘作业、副产矿管理、放矿控制、出矿管理, 满足矿山生产管理需求^[3]。

1 生产地质取样

矿山生产地质取样是指为适应采矿工艺对采矿过程中的生产探矿工程取样和生产地质取样,是按照一定要求,从矿石、岩石和矿石产品中按一定规格要求采集一定数量的代表性样品,并通过对所取样品的分析测试,从而确定矿石质量(矿石中有益有害组分含量)的矿山地质工作。

生产期间地质取样主要包括:生产探矿钻探取样,生产探矿坑道、出矿穿脉、拉底进路、放矿点、矿石堆场的取样^[4]。生产地质取样及分析测试的频次为每天60~70件^[3]。

2 取样方法对比研究成果

2.1 手持X荧光测试法与巷道刻槽法对比

2.1.1 刻槽取样法

本次实验选择在3670 m中段CM16-1穿脉中进行,实验地段矿化较强。使用的刻槽断面规格为10 cm×3 cm,取样长度:基本样长2 m。刻样前先平整、清干净壁面上的污物或外来物后方可刻取。样槽下方采用铺垫清洁油布或坚韧聚塑布或橡皮垫接样,以防样品散失。共40 m(20个刻槽样),刻槽样化学分析结果:铜品位0.095%~0.890%,平均品位0.36%^[5]。

2.1.2 X荧光测试方法

1) X荧光测试是在已完成巷道刻槽取样的样沟上进行,把每个刻槽样平均分为20个测区(测区长0.1 m),每个测区测试1个品位值(在测区内缓慢来回移动,测试时间30 s,见图1),得到的20个品位值的平均品位作为该刻槽样对应的X荧光测试品位值。

2) X荧光测试是在已完成巷道刻槽取样的样沟上进行,把每个刻槽样平均分为40个测区(测区长0.05 m),每个测区测试1个品位值(在测区内固定测点,测试时间30 s),得到的40个品位值的平均品位作为该刻槽样对应的X荧光测试品位值^[6]。

2.1.3 对比情况

荧光分析结果与刻槽对比分析结果对比为

1) 在测区内缓慢来回移动测试的对比结果:绝对相差值-0.194~0.080,平均值-0.011;相对偏差值-38.39%~

22.22%,平均值-2.96%。从表1可以看出,虽然绝对相差和相对偏差的平均值不太大,但个体的相差值和偏差值波动都较大,20个样品中相对偏差大于30%的有2个,占总数的10%,合格率为60%(见表1)^[6]。

从表1中可以看出,相对偏差值的波动与矿石品位的高低无关,也就是正偏差和负偏差没有规律,但品位的平均误差很小,相对误差率均小于允许限。

2) 在测区内固定测点进行测试的对比结果:绝对相差值-0.020~0.177,平均值-0.065;相对偏差值-4.88%~30.43%,平均值15.22%。从表2可以看出,个体的绝对相差值和相对偏差值波动都较大,6个样品中相对偏差的绝对值大于20%的有2个,占总数的33%,合格率为33%(见表2)。

2.1.4 原因分析

通过对荧光测试跟化学分析的过程及结果对比,认为造成荧光测试结果偏差较大、合格率较低的主要原因有:测试面平整度及清洁度均较差、荧光分析仪有效测试范围、样沟内的样品粒度较粗、均匀性差,X荧光分析仪未经过任何调试、校正,仪器参数均为出厂参数,影响X荧光巷道取样分析结果。

2.1.5 对比结果

若采用X荧光分析仪测试的巷道壁上的地质样品,其测试结果与化学分析的测试结果对比,有些单样差值稍微大,平均误差在-2.96%~15.22%之间,超过允许限。手持X荧光分析仪在测区内固定测点测试



图1 现场测试

方法,偏差较大,达不到预期目的;手持 X 荧光分析仪在测区内缓慢来回移动测试方法,合格率为 60%,接近规范要求,平均相对误差小于允许限,说明 X 荧光采样法有一定的研究价值,可以调试参数,消除外在影响因素,在一些对矿体圈定、品位计算影响不大的坑道,如拉底、沿脉、联道、硐室等工程推广应用。

表 1 普朗铜矿 3 670 m 中段 CM16 工程样品分析结果

序号	样品编号	样品长度/m	化学分析 结果/(Cu%)	荧光分析 结果/(Cu%)	平均品 位/(Cu%)	基与平均		允许误 差/%	是否合格
						误差	相对误差/%		
1	H6	2	0.250	0.293	0.272	-0.022	-8.09	9.28	合格
2	H8	2	0.250	0.244	0.247	0.003	1.21	9.49	合格
3	H9	2	0.340	0.285	0.313	0.027	8.63	8.98	合格
4	H10	2	0.330	0.260	0.295	0.035	11.86	9.11	不合格
5	H11	2	0.330	0.276	0.303	0.027	8.91	9.05	合格
6	H12	2	0.300	0.287	0.294	0.006	2.04	9.11	合格
7	H13	2	0.280	0.456	0.368	-0.088	-23.91	8.64	不合格
8	H14	2	0.480	0.455	0.468	0.012	2.56	8.16	合格
9	H15	2	0.440	0.500	0.470	-0.030	-6.38	8.15	合格
10	H16	2	0.320	0.361	0.341	-0.021	-6.16	8.8	合格
11	H17	2	0.400	0.321	0.361	0.039	10.80	8.68	不合格
12	H18	2	0.130	0.292	0.211	-0.081	-38.39	9.83	不合格
13	H19	2	0.300	0.278	0.289	0.011	3.81	9.15	合格
14	H20	2	0.410	0.330	0.370	0.040	10.81	8.63	不合格
15	H21	2	0.890	0.922	0.906	-0.016	-1.77	6.89	合格
16	H22	2	0.440	0.279	0.36	0.080	22.22	8.69	不合格
17	H23	2	0.490	0.515	0.503	-0.013	-2.58	8.01	合格
18	H24	2	0.350	0.737	0.544	-0.194	-35.66	7.86	不合格
19	H27	2	0.370	0.374	0.372	-0.002	-0.54	8.62	合格
20	H28	2	0.095	0.149	0.122	-0.027	-22.13	11.08	不合格
平均值			0.360	0.381	0.371	-0.011	-2.96	8.63	合格

注:判定依据是当重复分析结果的相对偏差小于等于允许限时为合格,大于允许限时为不合格^[7]

表 2 普朗铜矿 3 670 m 中段 CM16 工程样品分析结果

序号	样品编号	样品长度/m	化学分析 结果/(Cu%)	荧光分析 结果/(Cu%)	平均品 位/(Cu%)	基与平均		允许误 差/%	是否合格
						误差	相对误差/%		
1	H1	1.6	0.450	0.240	0.345	0.105	30.43	8.78	不合格
2	H2	2.0	0.410	0.314	0.362	0.048	13.26	8.68	不合格
3	H21	2.0	0.890	0.536	0.713	0.177	24.82	7.34	不合格
4	H22	20.0	0.440	0.297	0.369	0.071	19.24	8.64	不合格
5	H27	2.0	0.370	0.352	0.361	0.009	2.49	8.68	合格
6	H32	2.0	0.390	0.430	0.410	-0.020	-4.88	8.42	合格
平均值			0.492	0.362	0.427	0.065	15.22	8.34	不合格

2.2 方格法与刻槽法对比

2.2.1 坑道刻槽样

刻槽断面规格为 10 cm×3 cm,取样长度:基本样长 2 m,刻样前先平整、清干净壁面上的污物或外来物后方能刻取。样槽下方采用铺垫清洁油布或坚韧聚塑布或橡皮垫接样,以防样品散失。本次采样在 3 700 m 回风巷 6[#]~8[#],7[#]~24[#]和 24[#]~16[#]连续刻槽 300 m,共 150 件样品。

2.2.2 坑道方格样

坑道网格样在坑道壁上 1 m×2 m 的范围内,按 25 cm×20 cm~25 cm×40 cm 划分成方格,用钢钎在每

个方格内采取岩(矿)石,然后合成一个地质样样品.又在同一位置0~100 m处采用25 cm×20 cm网格法在40个点采样50件;100~200 m处采用25 cm×25 cm网格法在32个点采样50件;200~300 m处采用25 cm×40 cm网格法在20个点采样50件.

2.2.3 对比研究

通过试验对比,可以看出(见表3):全部样品刻槽样平均品位为0.492%,方格样平均品位为0.511%,相对误差-0.01,相对误差率-1.99%.其中0~100 m处,刻槽样样品平均品位0.283%,网格样平均品位0.301%,相对误差-0.009,相对误差率-3.08%;100~200 m处,刻槽样样品平均品位0.491%,网格样平均品位0.493%,相对误差-0.001,相对误差率-0.2%;200~300 m处,刻槽样平均品位0.703%,方格样平均品位0.739%,相对误差-0.018,相对误差率-2.5%^[8].

表3 普朗铜矿一期采选工程取样方法对比试验数据

序号	取样位置	刻槽法化 验品位/(Cu%)	网格法化 验品位/(Cu%)	平均品 位/Cu(%)	基与平均		允许误 差/%	是否 合格	备注
					误差	相对误差/%			
1	全样均值	0.492	0.511	0.502	-0.010	-1.99	8.02	合格	
2	全样均方差	0.239	0.245						全部样品
3	全样变化系数	48.56	47.93						
4	1~50 全样均值	0.283	0.301	0.292	-0.009	-3.08	9.13	合格	网格法
5	1~50 全样均方差	0.17	0.16						25 cm×20 cm
6	1~50 全样变化系数	60	53.25						
7	51~100 全样均值	0.491	0.493	0.492	-0.001	-0.2	8.06	合格	网格法
8	51~100 全样均方差	0.148	0.123						25 cm×25 cm
9	51~100 全样变化系数	30.22	24.89						
10	101~150 全样均值	0.703	0.739	0.721	-0.018	-2.5	7.32	合格	网格法
11	101~150 全样均方差	0.181	0.208						25 cm×40 cm
12	101~150 全样变化系数	25.82	28.12						

2.2.4 对比结果

从以上的2种方法对比看,刻槽法采样和方格法采样虽然有些单样差值稍微大,但矿体的平均误差很小,相对误差率均小于允许限,因此普朗铜矿采用方格法采样也是具有代表性的,完全能满足生产地质取样工作和今后矿山的生产需求.

考虑到采样效率及减少体力劳动,建议采用样长2 m,重量8~10 kg,25 cm×25 cm方格法进行基本分析样的采集^[9].

2.3 X荧光分析法与拣块法对比

2.3.1 研究地点选择

由于前期拉底的放矿点较少,不能满足试验的要求,而矿石堆场与采场的爆堆环境较为相似,故选择地表的矿石堆场进行对比试验^[4].

2.3.2 试验方法

1)首先把待试验的矿石堆场划分为约4 m×4 m的测区,每个测区用X荧光分析仪测试n个品位值,得到的n个品位值的平均品位值作为该测区对应的X荧光测试品位值.各测区内矿石的测试点选择遵循以下原则^[5]:

- (1)待测矿石选择测区矿堆两条长对角线经过的矿石;
- (2)沿两条长对角线方向各间距20 cm测试1个品位值;
- (3)测试点尽量选择较干净、较平整的面;

(4)每个测试点的测试时间为45 s.

该方法耗时较长,仅测试了1件样品(YH1).

2)首先把待试验的矿石堆场划分为约4 m×4 m的测区,每个测区选择矿堆2条长对角线经过的矿石进行拣块(或打块),每块不大于5 cm,合成一个样品,总重量约10 kg;每块矿石用X荧光分析仪测量2个点,每个测试点的测试时间为30 s;块状矿石样品送化验室进行化学分析.由于每1个样品的矿块有约100小块,考虑到若每块矿石都进行测试,则1个样品的测试时间约2 h,不符合快速测试的目的,故本次实验按每个样品选择9块小矿块进行测试,每块小矿块测试两个面.共测试了3件样品(YH8~YH10).

3)选择2~3 kg的矿块进行样品测试,每块样品选择5或6个面,每个面测3个点,测试的平均值代表矿块的X荧光测试品位值,再把测试过的矿块送化验室进行测试.共测试了6件样品(YH2~YH7).

2.3.3 对比研究

矿石样品通过荧光分析与化学分析对比结果见表4.

表4 矿石样Cu元素荧光分析测试结果与化学分析结果

序号	样品编号	化学分析 结果/(Cu%)	荧光分析 结果/(Cu%)	平均品 位/(Cu%)	基与平均		允许误 差/%	是否合格
					误差	相对误差/%		
1	YH1	1.100	1.200	1.150	-0.050	-4.35	6.46	合格
2	YH2	0.370	1.128	0.749	-0.379	-50.60	7.25	不合格
3	YH3	1.280	1.173	1.227	0.053	4.32	6.34	合格
4	YH4	0.368	1.231	0.800	-0.432	-54.00	7.12	不合格
5	YH5	2.440	1.182	1.811	0.629	34.73	5.67	不合格
6	YH6	0.998	1.749	1.374	-0.376	-27.37	6.15	不合格
7	YH7	1.320	1.982	1.651	-0.331	-20.05	5.83	不合格
8	YH8	0.465	0.636	0.551	-0.086	-15.61	7.83	不合格
9	YH9	0.358	0.508	0.433	-0.075	-17.32	8.31	不合格
10	YH10	0.588	0.516	0.552	0.036	6.52	7.83	合格
平均值		0.929	1.131	1.030	-0.101	-9.81	6.66	不合格

通过上表可以看出:块状样品的荧光分析耗时较长,与化学分析的偏差较大,相对偏差-50.6%~34.73%,合格率仅达到30%^[7].

2.3.4 原因分析

通过对荧光测试跟化学分析的过程及结果对比,认为造成荧光测试结果偏差较大、合格率较低的主要原因有:所选样品为堆场内的块状样品,测试面平整度及清洁度均较差、荧光分析仪有效测试范围、样品粒度较粗、均匀性差,X荧光分析仪未经过任何调试、校正,仪器参数均为出厂参数,影响X荧光巷道取样分析结果.

2.3.5 对比结果

若采用X荧光分析仪手持测试未经加工的块状样品,其测试结果与化学分析的测试结果偏差较大,采用此种方法来测试样品的话,达不到预期目的.

3 结论

1) X荧光采样法可以通过调试参数,消除外在影响因素,在一些对矿体圈定、品位计算影响不大的坑道,如拉底、沿脉、联道、硐室等工程推广应用.但X荧光分析仪测试在测区内固定测点测试,偏差较大,达不到预期目的;测试未经加工的块状样品,其测试结果偏差较大,达不到预期目的.

2)刻槽法采样和方格法采样虽然有些单样差值稍微大,但矿体的平均误差很小,相对误差率均小于允许限.

3)普朗铜矿采用方格法完全能满足生产地质取样工作和今后矿山的生产需求.

参考文献:

- [1] 范玉华,曹晓民,张世权,等.云南迪庆普朗铜矿区勘探地质报告[R].云南省地质调查院,2011:7.
- [2] 董必作,葛启发,刘育民,等.云南迪庆有色金属有限责任公司普朗铜矿一期采选工程初步设计书[R].中国恩菲工程技术有限公司,2014:189.
- [3] 吴练荣,冯兴隆,沈啟武,等.普朗铜矿供矿管理办法[S].迪庆:云南迪庆有色金属有限公司,2016:12.
- [4] 吴练荣,冯兴隆,沈啟武,等.普朗铜矿样品取样、加工及分析测试管理办法[S].迪庆:云南迪庆有色金属有限公司,2016:12.
- [5] 吴练荣,吴维虎,沈啟武,等.普朗铜矿自然崩落采矿法取样方法与放矿管理研究报告[R].迪庆:云南迪庆有色金属有限公司,2016:12.
- [6] 王国强,李志鹏,施宝生,等.普朗铜矿地质样品分析方法运用创新[R].迪庆:云南迪庆有色金属有限公司,2018:3.
- [7] 中华人民共和国国土资源部.DZ0130-2006 地质矿产实验室测试质量管理规范[S].北京:中华人民共和国国土资源部,2006:9.
- [8] 刀建,郑泽光,梁宇航,等.普朗铜矿一期采选工程基建地质总结报告[R].玉溪飛亚矿业开发管理有限责任公司,2016:196-201.
- [9] 中华人民共和国国土资源部.DZ/T0078-2015 固体矿产勘查原始地质编录规程[S].北京:中华人民共和国国土资源部,2015:4.

(上接第39页)

该矿下一个月的采空区瓦斯抽采纯量用3种模型预测的结果分别是1.478,1.612,1.515,而实际的抽采量是1.520,从而可进一步的证明GM(1,1)残差-Markov确实是3种预测模型中最好的.根据新陈代谢的原理将原有的数据去掉加入新的数据,则能形成长期稳定的采空区瓦斯抽采纯量的新的原始数据,继续预测下一步的采空区瓦斯抽采纯量,依次可实施采空区瓦斯抽采纯量的动态预测.

4 结论

1)灰色理论预测模型作为采空区瓦斯抽采纯量的预测方法是可行的.

2)传统的GM(1,1)模型用来预测采空区瓦斯抽采纯量是不合格的,但是经过残差修正后其精度等级明显的提高,达到合格等级;而结合了Markov预测模型的预测波动序列的优点的GM(1,1)残差-Markov预测模型,其预测精度能进一步提高,精度等级能达到优等.

3)GM(1,1)残差-Markov预测模型可以作为采空区瓦斯抽采纯量的预测模型并加以推广应用.

参考文献:

- [1] 林柏强.中国能源发展报告2017[M].北京:北京大学出版社,2017.
- [2] 中国煤炭工业协会.《2017煤炭行业发展年度报告》[R].
- [3] 刘思峰,杨英杰,吴利丰.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2014.
- [4] 孙林,杨世元.基于LS-SVM的回采工作面瓦斯涌出量预测[J].煤炭学报,2008,33(12):1377-1380.
- [5] 施式亮,伍爱友.GM(1,1)模型与线性回归组合方法在矿井瓦斯涌出量预测中的应用[J].煤炭学报,2008(4):415-418.
- [6] 钱家忠,朱学愚,吴剑锋,等.矿井涌水量的灰色马尔可夫预报模型[J].煤炭学报,2000(1):73-77.
- [7] 朱愿福,王长申,李彦周,等.改进的灰色系统理论预测矿井涌水量[J].煤田地质与勘探,2014,42(4):44-49.
- [8] 刘寿兰,周新良,罗文柯,等.基于改进灰色马尔可夫模型对我国煤炭生产总量的预测[J].矿业工程研究,2011,26(1):76-80.
- [9] 周晓明,罗文柯,李润球.改进GM(1,1)预测模型对我国煤炭消费需求的预测分析[J].矿业工程研究,2010,25(2):65-68.
- [10] 李润求,施式亮,念其锋,等.基于灰色系统理论的煤矿安全生产形势预测[J].矿业工程研究,2010,25(3):54-58.
- [11] 秦志.基于灰色理论的回采工作面瓦斯涌出量动态预测研究[J].能源与环保,2018,40(2):17-21.
- [12] 陈明.合理确定煤矿瓦斯抽采量及抽采系统的探讨[J].煤炭工程,2007(9):12-14.

不同轮毂比对矿用对旋式轴流通风机电动性能影响分析

钟丽¹, 金永平^{2*}

(1. 湖南科技大学 期刊社, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 矿用对旋式轴流风机因其流量大、效率高、安全可靠等特点, 在矿山通风领域中应用十分广泛, 本文以矿用对旋式轴流风机为研究对象, 首先运用三维 Solidworks 软件构建不同风机轮毂比的矿用对旋式轴流风机三维几何模型, 然后利用计算流体力学软件 Fluent 分析不同风机轮毂比对矿用对旋式轴流风机气动性能的影响, 结果表明: 随着矿用对旋式轴流风机轮毂比的增大, 矿用对旋式轴流风机的全压会先增大而后减小, 而矿用对旋式轴流风机的效率会不断增大. 通过进一步对比不同轮毂下的矿用对旋式轴流风机内部三维流场的流动状况可知, 当轮毂比为 0.6 时通风机三维流场的流动状况更为理想. 研究结果对矿用对旋式轴流风机的优化设计具有重要的指导意义.

关键词: 矿用对旋式通风机; 轮毂比; 气动性能; 分析

中图分类号: TD441.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2018)04-0068-05

Analysis of Hub Ratio on the Aerodynamic Performance of Mine Contra-Rotating Axial Fan

Zhong Li¹, Jin Yongping²

(1. Periodical Press of Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Mine contra-rotating axial fan is widely used in mine ventilation field for its high gas volume, high efficiency, safety and reliability. In this paper, the mine contra-rotating axial fan is used as the research target. Firstly, the three-dimensional software Solidworks is used to build the three-dimensional geometric model of mine contra-rotating axial fan. Secondly, the effects of the hub ratio on the aerodynamic performance of fan is studied by using the computational fluid dynamics method. Results show that by increasing the hub ratio, the total-pressure of the mine contra-rotating axial fan is increased at the beginning and decreased in the end, and the efficiency of the mine contra-rotating axial fan is enhanced along with the increase of the hub ratio. Further analysis shows when hub ratio is set to 0.6, the three-dimensional flow is more rational than others. This research has great significance for optimization design of the mine contra-rotating axial fan.

Keywords: mine contra-rotating axial fan; hub ratio; aerodynamic performance; analysis

矿用对旋式轴流风机因其流量大、效率较高、安全可靠等优点, 在矿山通风领域中应用广泛^[1]. 矿用对旋式轴流风机气动性能中的全压、效率等是衡量矿用对旋式轴流风机的重要指标, 通过开展矿用对旋式轴流风机气动性能研究, 进而为设计效率高、噪音低的矿用对旋式轴流风机提供技术支撑, 已经

成为相关学者的研究热点.刘晶^[2]运用 CFD 软件,分析对旋通风机内部流场速度、压力等的分布情况.刘德顺^[3]通过构建矿用对旋式轴流通风机的三维气动模型,研究通风机气动噪声产生机理和内部三维流场情况.戴巨川^[4]采用粒子群优化算法对矿用对旋式轴流通风机的不同扩散器结构进行参数化优化设计.幸欣^[5]开展了不同安装角对对旋局部通风机调节性能及其内部流动影响分析,当同时增大对旋局部通风机两级叶片的安装角时,该对旋局部通风机的全压曲线将向右上移动,则对旋局部通风机在大流量、低风压的工况下运行效率高.金永平^[6]利用 Fluent 软件分析了不同叶片数及轴向间隙对矿用对旋式轴流通风机气动性能的影响.上述研究工作中主要涉及叶片数、轴向间隙、叶片的安装角等对对旋式通风机气动性能的影响,而对于矿用对旋式轴流通风机叶片的轮毂比(所述的轮毂比为通风机轮毂直径与叶轮直径的比值)对矿用对旋式轴流通风机气动性能的研究鲜见文献报道.

本文以矿用对旋式轴流通风机为研究对象,运用三维 Solidworks 软件构建不同轮毂比的矿用对旋式轴流通风机三维几何模型,利用计算流体力学软件 FLUENT 分析不同风机轮毂比对矿用对旋式轴流通风机气动性能的影响,为矿用对旋式轴流通风机结构的优化设计提供技术支撑.

1 矿用对旋式轴流通风机结构参数与数值模拟方法

本文以某煤矿矿用对旋式轴流通风机的主扇作为物理模型,该通风机的设计参数如表 1 所示,在矿用对旋式轴流通风机三维模型构建时,将通风机叶轮直径设为固定值.

表 1 通风机设计参数

流量/ (m^3/min)	转速/ (r/min)	叶轮直 径/ mm	第一级叶轮叶 片安装角 $\beta_1/(\text{°})$	第二级叶轮叶 片安装角 $\beta_2/(\text{°})$	第一级叶 轮叶片数	第二级叶轮 叶片数
1 928.6	980	1 500	37.8	28.3	16	13

运用三维 Solidworks 软件建立矿用对旋式轴流通风机叶轮的三维模型(如图 1),在第一级叶轮前端加上集流器和流线罩,在第二级叶轮后端加上扩散器以形成一个完整的通风机三维几何模型(如图 2).

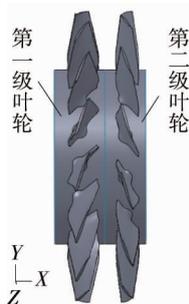


图 1 叶轮模型

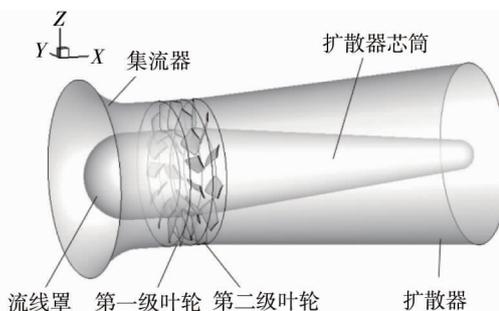


图 2 通风机三维几何模型

将通风机三维几何模型导入到计算流体力学(CFD)前处理软件 Gambit 中,应用非结构四面体网格 TGrid 对通风机三维几何模型进行网格化(图 3),然后应用 Fluent 软件对其进行三维流场模拟,采用三维定常 Navier-Stokes 方程和标准 $k-\varepsilon$ 模型进行求解^[7].

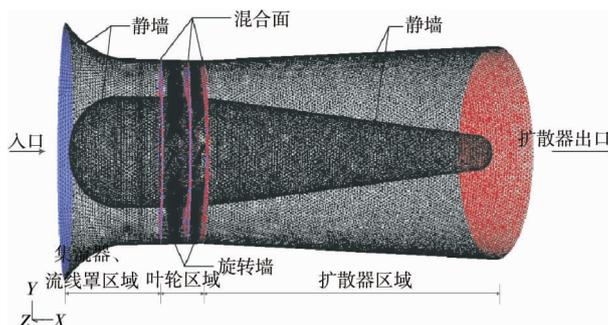


图 3 通风机计算网格及边界条件

在三维定常不可压缩流动下,经过雷诺平均后的连续性方程和动量方程其形式如下:

a) 连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

b) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right]. \quad (2)$$

式中: ρ 为气体密度; p 为时均压力; μ 为动力粘性系数; v_i, v_j 为速度分量; μ_t 为流体湍流粘性系数, 可表示为 k 和 ε 的函数 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, 为了使方程封闭, 还需要湍动能和湍动消耗率的运输方程, 这里采用标准模型, 方程为

c) 标准模型:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon; \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned}$$

式中: $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为经验常数, 其取值分别是: $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$.

2 数值模拟与结果分析

图4~图7分别给出了对应轮毂比分别为0.45, 0.50, 0.55, 0.60时, 矿用对旋式轴流通风机前后两级叶轮叶片各自压力面的全压分布. 由图4~图7可知, 对应于同一轮毂比的矿用对旋式轴流通风机而言, 第二级叶轮叶片的全压较第一级叶轮叶片的全压大, 这主要是由于第二级叶轮的入口压力是第一级叶轮的出口压力, 通过第二级叶轮叶片进一步加压, 使得矿用对旋式轴流通风机出口压力进一步提高. 进一步分析发现, 随着轮毂比的不断增大, 对应的第一级叶轮叶片压力面和第二级叶轮叶片压力面所受的全压将不断减小, 这样就使得各级叶轮叶片的安全系数进一步提高.

图8给出了不同轮毂比对应的矿用对旋式轴流通风机全压的影响, 由图8可知, 矿用对旋式轴流通风机的全压随着轮毂比增大先增大而后减小, 当轮毂比为0.55时, 矿用对旋式轴流通风机的全压为最高值2 654.13 Pa.

图9给出了不同轮毂比对应的矿用对旋式轴流通风机效率的影响, 由图9可知, 矿用对旋式轴流通风机的效率随着轮毂比增大而增大. 当轮毂比为0.55时, 矿用对旋式轴流通风机的效率为80.42%; 当轮毂比为0.6时, 矿用对旋式轴流通风机的效率为最高值81.69%, 对应此时的矿用对旋式轴流通风机的全压为2 512.36 Pa.

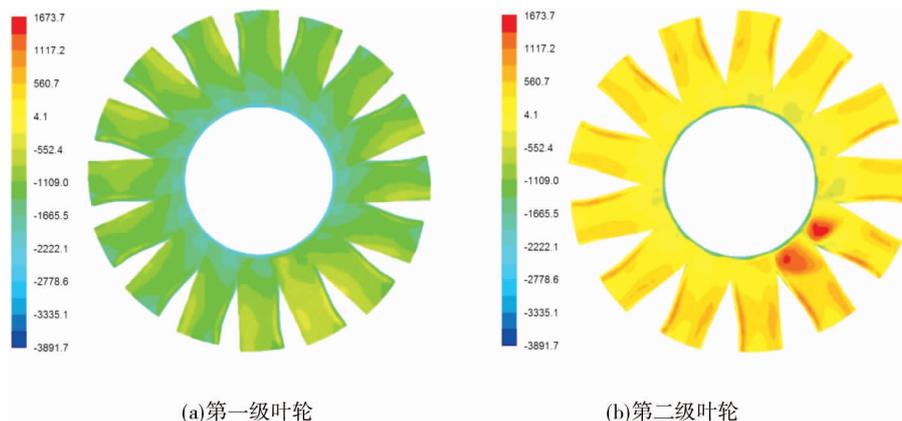


图4 轮毂比0.45时通风机前后两级叶片压力面的全压分布

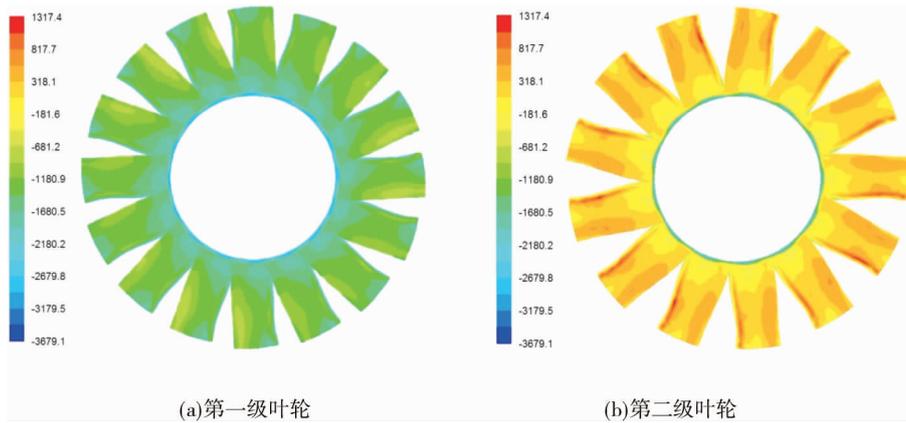


图 5 轮毂比 0.50 时通风机前后两级叶片压力面的全压分布

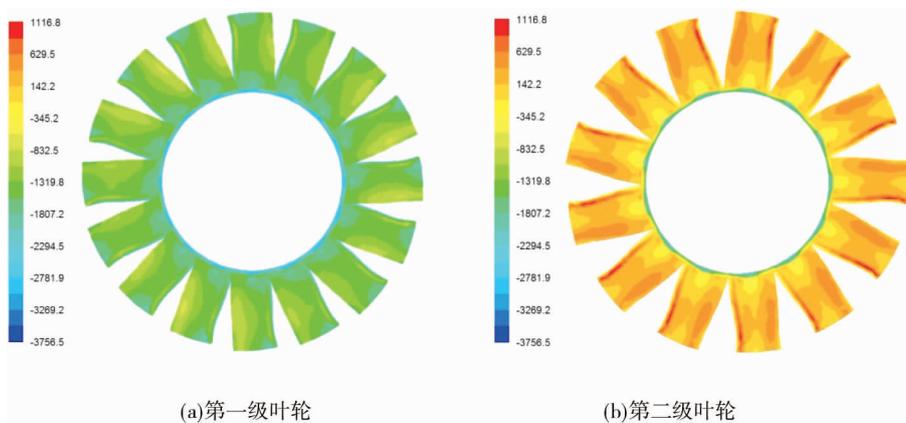


图 6 轮毂比 0.55 时通风机前后两级叶片压力面的全压分布

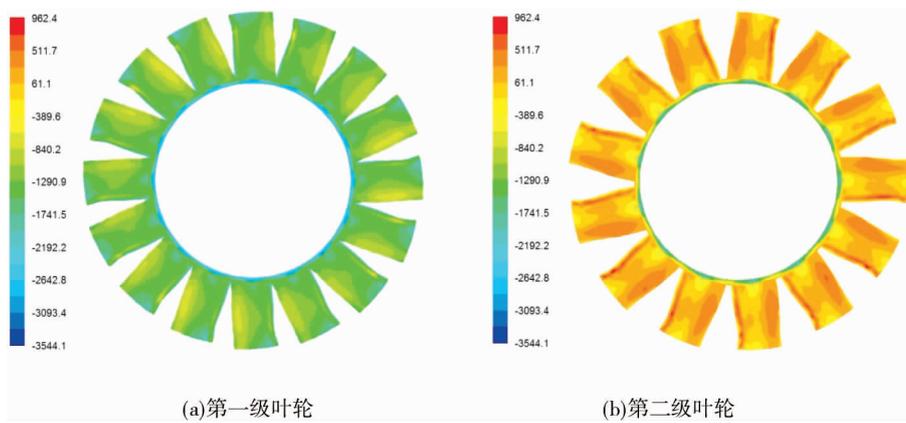


图 7 轮毂比 0.60 时通风机前后两级叶片压力面的全压分布

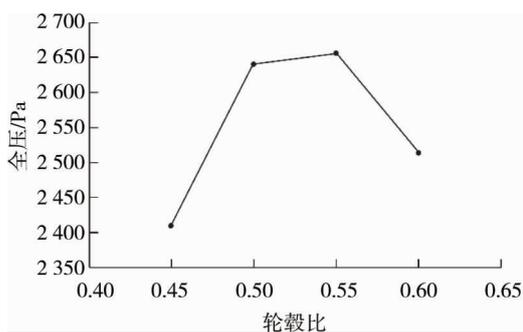


图 8 轮毂比对通风机全压的影响

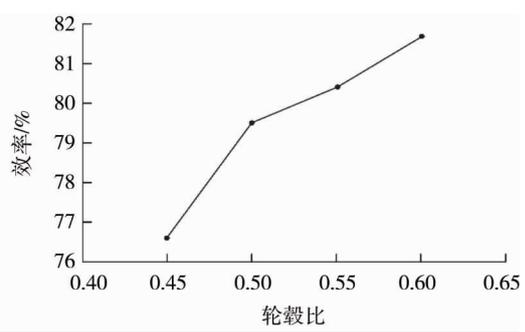


图 9 轮毂比对通风机效率的影响

为了进一步分析和研究对应不同轮毂比时,矿用对旋式轴流风机内部三维流场的流动状况,图10绘出了矿用对旋式轴流风机气流质点从通风机入口处进入通风机内部,经前后两级叶轮叶片加压后从扩散筒出口排出整个过程中,气流质点在矿用对旋式轴流风机内部三维流场的流动状况,由图10可见:当轮毂比为0.45,0.50,0.55时,矿用对旋式轴流风机内部扩散筒内有大量旋转气流,这些气流将会加速矿用对旋式轴流风机振动,将进一步加大矿用对旋式轴流风机气动噪声.当轮毂比为0.6时,矿用对旋式轴流风机内部扩散筒内的气流流动较为平稳,对应该轮毂比的矿用对旋式轴流风机振动以及气动噪声将会比轮毂比为0.45,0.50,0.55时小,因此,在矿用对旋式轴流风机选择轮毂比为0.6是较为理想的设计参数.

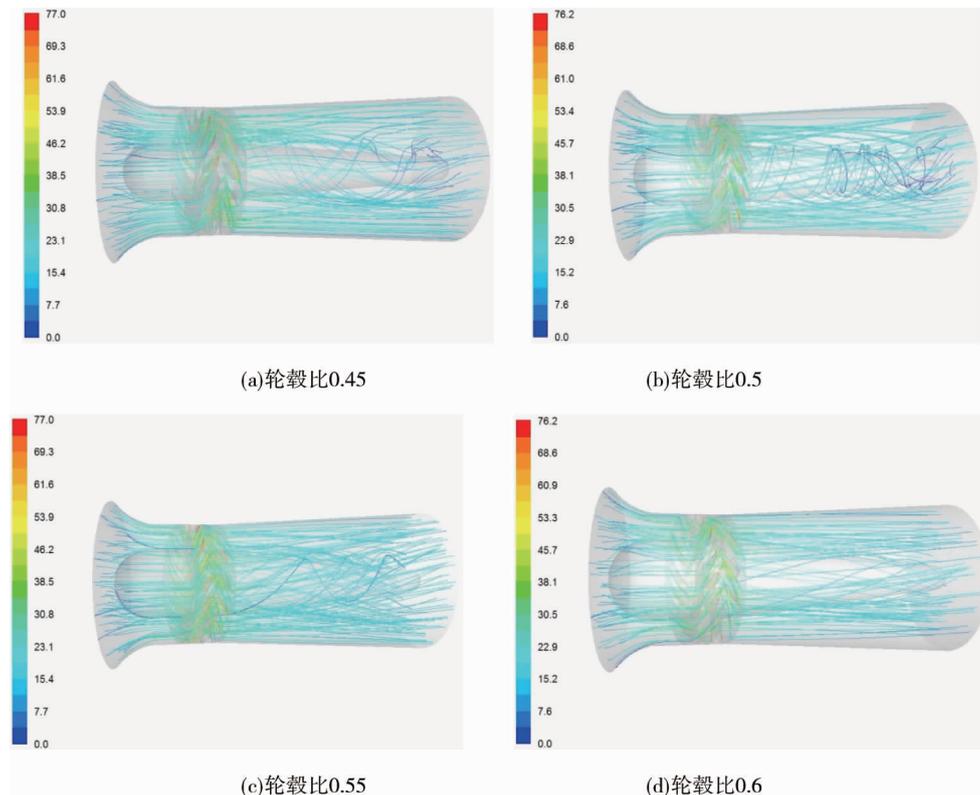


图10 矿用对旋式轴流风机内部三维流场的流动情况

3 结论

1) 随着轮毂比的不断增大,对应的矿用对旋式轴流风机第一级叶轮叶片压力面和第二级叶轮叶片压力面所受的全压将不断减小.

2) 随着矿用对旋式轴流风机轮毂比的增大,矿用对旋式轴流风机的全压会先增大而后减小,而矿用对旋式轴流风机的效率会不断增大.

3) 通过进一步对比不同轮毂下的矿用对旋式轴流风机内部三维流场的流动状况可知,当轮毂比为0.6时通风机三维流场的流动状况更为理想.

参考文献:

- [1] 商景泰.通风机实用技术手册[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 刘晶.对旋局部通风机振动与噪声研究[D].太原:太原理工大学,2017.
- [3] 刘德顺,金永平,岳文辉,等.矿用对旋式轴流风机气动噪声及三维流场数值模拟与分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2012,27(3):22-27.
- [4] 戴巨川,刘德顺,金永平,等.矿用对旋式轴流风机扩散器结构多目标优化设计[J].中国机械工程,2013,24(3):386-391.
- [5] 幸欣.基于叶片安装角调节的对旋局部通风机特性研究[D].太原:太原理工大学,2017.
- [6] 金永平,刘德顺,文泽军,等.叶片数及轴向间隙对矿用对旋式轴流风机气动性能的影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2010,25(4):29-32.
- [7] 韩占忠,王敬,兰小平.Fluent 流体工程仿真计算实例与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2004.

三相光伏逆变器多机并联谐振抑制控制策略

刘建峰*

(国网电力科学研究院,江苏南京 211106)

摘要:大型光伏电站必须采用三相并网方式以保障电网三相平衡,而采用传统 PI 加电压前馈控制方式,当接在并网变压器同一绕组达到一定数量后,逆变器并网电流会发生震荡,严重时甚至会因为超过安规 THD 而发生逆变器脱网,严重影响光伏电站的运行.通过研究逆变器多机并联系统电网侧输出电流的谐振特性,提出以虚拟电阻串电容替代实际硬件电路的控制策略,不仅有效抑制多机并联谐振问题且保证了逆变器的高效.最后,通过仿真与实验研究了最优虚拟阻值的选取,且验证了该控制策略的实际应用性.

关键词:多机并联;LCL 滤波器;电流谐振;虚拟电阻

中图分类号:TM464 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)04-0073-06

Control Strategy of Parallel Resonance Suppression for Three-phase Photovoltaic Inverter

Liu Jianfeng

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: The three-phase grid-connected mode must be adopted in large PV power station to ensure the three-phase balance of the power network. By using the traditional PI method, when connected to the same winding of grid-connected transformer to a certain number, the grid-connected current of the inverter will vibrate. Seriously, the inverter will de-grid because it will be over the safety THD, which will seriously affect the operation of PV power station. By studying the resonant characteristics of the output current of the multi-inverter parallel system, a virtual resistor series capacitor method is proposed in this paper, which can suppress the resonance effectively. Finally, the optimal virtual resistance is studied, and the practical application of control strategy is proved.

Keywords: multi-paralleled inverters; LCL filter; current resonance; virtual resistance

近年来,随着新能源技术的广泛推进,分布式光伏发电技术得到大力发展.国家“光伏领跑者计划”重点支持光伏发电在矿山节能、废旧矿山基地绿色发展中的应用.2015年6月,《大同采煤沉陷区光伏发电基地规划及2015年实施方案》获得国家能源局批准,成为首个“光伏领跑者示范基地”.目前,分布式光伏发电系统接入电网普遍采用直流母线方式^[1],该方式下需要多个逆变器并联后再接入电网,但矿山供电系统复杂,电能质量较差,现有的光伏逆变器较难适应矿山要求.LCL滤波器因其兼具低频和高频效益,可减少电感的体积及滤波器成本^[2,3],被广泛应用于光伏并网逆变器.但LCL滤波器的引入会增加系统谐振问题,且当含LCL滤波器的逆变器多机并联后又会给系统引入新的问题.

多滤波器的逆变器并联系统,输出谐振特性发生变化,跟随逆变器并联数目的增加,谐振波峰的及其频率均有所降低,且低次谐波的比例增加^[4,5].文献[6]提出一种基于网测电压、电流双闭环重复控制策略;文献[7]在逆变器控制上采用交错并联方式,能有效降低系统谐波,但考虑电网侧阻抗时效果不理想;文献[8,9]讨论了多逆变器并联系统中,逆变器的相互作用将激发各种频率下的复杂谐振,并引入有源阻尼控制法,能有效抑制系统谐振,但其忽略了对引入阻尼法后谐振电流的抑制分析,且未对最优阻尼值进行研究.

本文针对逆变器多机并联系统,采用等效电流源模型对其进行分析建模.然后分析逆变器并联数量对系统输出电流的影响,之后,基于虚拟电阻串电容算法对系统谐振及输出电流进行分析,并对最优虚拟阻值进行研究.最后,仿真及实验显示该方法能有效抑制系统谐振,证明研究的有效性.

1 光伏并网单逆变器系统模型

基于LCL滤波并网逆变器的电路拓扑结构如图1所示^[10].图中 L_1, R_1 为逆变器侧电感和等效电阻, L_2, R_2 为电网侧电感和等效电阻, C 为滤波电容.

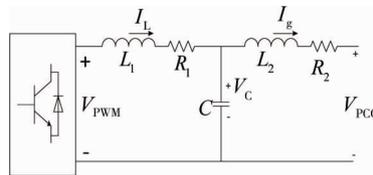


图1 LCL滤波并网逆变器拓扑结构

图1中: V_{PCC} 为并网点电压; V_{PWM} 为光伏逆变器输出电压; V_C 为电容电压; I_L 为逆变器电感电流; I_g 为流入电网侧电流; I^* 为给定电流值.采用传统PI控制方法时,以 I_L 为电流环控制量,为了提高电流环控制带宽加入 V_C 为前馈环节,控制框图见图2所示.

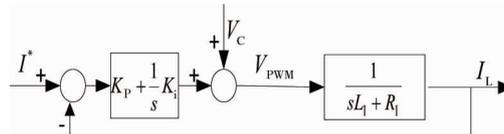


图2 逆变器侧电流环控制框图

图2中: s 为复变量; K_i, K_p 分别为控制器积分、比例系数.

根据图2可得逆变器输出电压指令为

$$V_{PWM}(s) = V_C(s) + (K_p(s) + \frac{1}{s}K_i(s))(I^*(s) - I_L(s)). \quad (1)$$

LCL滤波环节传递函数为

$$I_L(s) = H_1(s)V_{PWM}(s) + H_2(s)V_{PCC}(s); \quad (2)$$

$$I_g(s) = H_3(s)V_{PWM}(s) + H_4(s)V_{PCC}(s); \quad (3)$$

$$V_C(s) = H_5(s)V_{PWM}(s) + H_6(s)V_{PCC}(s). \quad (4)$$

式(2)~式(4)中各传递函数分别为

$$H_1(s) = (L_2Cs^2 + R_2Cs + 1)/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_2(s) = -1/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_3(s) = 1/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_4(s) = -(L_2Cs^2 + R_1Cs + 1)/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_5(s) = (L_2s + R_2)/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_6(s) = (L_1s + R_1)/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2].$$

联立式(1) ~ 式(4) 可得

$$I_g(s) = G_{IL}(s)I^*(s) - Y_{eq}(s)V_{PCC}(s). \quad (5)$$

式中: $G_{IL}(s)$ 和 $Y_{eq}(s)$ 分别为给定电流至电网电流的传递函数和逆变器侧等效输出导纳的传递函数, 表达式为

$$G_{IL}(s) = \frac{G_{PI}(s)H_3(s)}{1 - H_5(s) + G_{PI}(s)H_1(s)}; \quad (6)$$

$$Y_{eq}(s) = \frac{G_{PI}(s)H_2(s)H_3(s) - H_3(s)H_6(s)}{1 - H_5(s) + G_{PI}(s)H_1(s)} - H_4(s). \quad (7)$$

式中: $G_{PI}(s) = K_P(s) + \frac{1}{s}K_I(s)$.

根据式(5)可将单个并网逆变器的等效模型简化为电流源模型, 如图3所示.

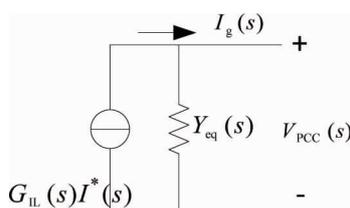


图3 并网逆变器等效电流源电路

2 光伏并网逆变器多机并联模型及分析

图3表示单个并网逆变器的等效电路, 将 N 个等效电路进行并联可得对并网逆变器并联配电网等效电路. 等效电路见图4所示.

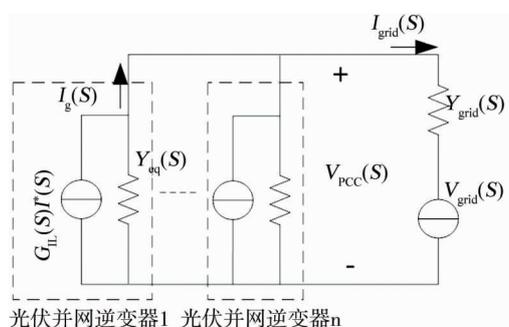


图4 光伏并网逆变器多机并联等效电路

如图4所示, 并网点电流 $I_{grid}(s)$ 表示并网逆变器输出电流之和, $Y_{grid}(s)$, $V_{grid}(s)$ 分别表示电网电压和线路等效导纳.

根据戴维南定理可得逆变器多机并联时并网电压 V_{PCC} 表达式, 设定逆变器参数一致.

$$V_{PCC} = \frac{NG_{IL}(s)I^*(s) + V_{grid}(s)Y_{grid}(s)}{NY_{eq}(s) + Y_{grid}(s)}. \quad (8)$$

联立式(5)和式(8), 可得 N 个并联后逆变器的输出电流为

$$I_g(s) = G_{IL}^N(s)I^*(s) - Y_{eq}^N(s)V_{grid}(s). \quad (9)$$

式中: G_{IL}^N 和 Y_{eq}^N 分别为并联后给定电流至实际电流的传递函数和并联后等效导纳的传递函数, 表达式是

$$G_{IL}^N = G_{IL}(s) - \frac{NY_{eq}(s)G_{IL}(s)}{NY_{eq}(s) + Y_{grid}(s)}; \quad (10)$$

$$Y_{eq}^N = \frac{Y_{eq}(s)Y_{grid}(s)}{NY_{eq}(s) + Y_{grid}(s)}. \quad (11)$$

并网逆变器系统参数： L_1, R_1 为 3 mH, 0.01 Ω ； L_2, R_2 为 0.3 mH, 0.04 Ω ； C 为 40 μ F；电网侧等效电感 L_{grid} ，电阻 R_{grid} 为 0.1 mH, 0.01 Ω ；电网侧电压 V_{grid} ，频率 f_{grid} 为 220 V, 50 Hz；直流侧电压 V_{dc} 为 600 V； K_p, K_i 为 30, 0.3；逆变器开关频率 f_g 为 20 kHz. 详见表 1 所示. 图 5 为的伯德图.

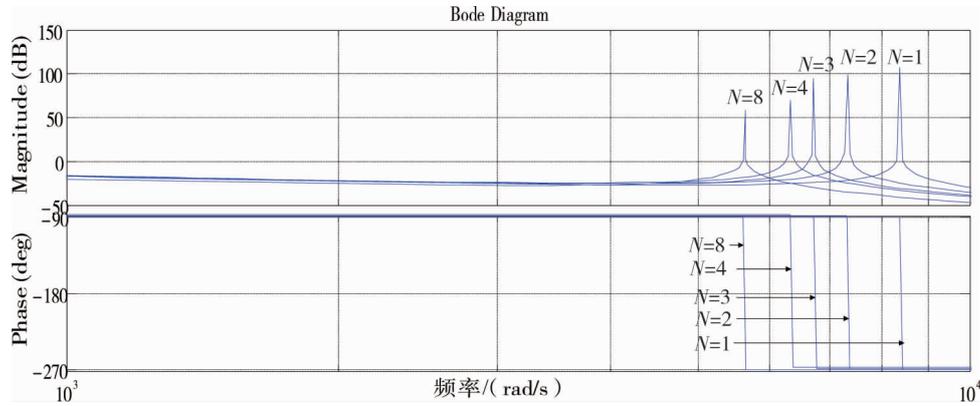


图 5 给定电流至实际电流系数 Bode 图

图 5 表示不同 N 时网侧电流对于给定电流传递函数的 Bode 图, 可知随着并联逆变器个数 N 的增加, 谐振波峰频率逐渐下降, 若谐振频率与网侧电流频率相近时, 会增大电流谐波; 同时, 随着 N 的增加谐振波峰峰值降低.

3 虚拟电阻串电容法研究

3.1 串联虚拟电阻控制算法研究

通过上述两节的分析可得, LCL 滤波器含有固定谐振峰, 由文献[11]可得阻尼法能够很好的抑制谐振峰, 但是无源阻尼法增加系统损耗, 所以本文采取串联虚拟阻尼法, 即虚拟电阻串电容算法. 如图 6 所示.

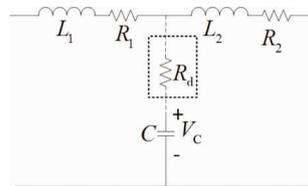


图 6 虚拟电阻串电容的电路

该方法是一种简单可行且可以实现的方法, 即将电容电流通过微分环境 sCR_d 负反馈至电流给定, 再经过 PI 控制而实现有源阻尼控制. 根据基尔霍夫电流定理可得 $I_c(s) = I_L(s) - I_g(s)$, 虚拟电阻电压修正量:

$$V_{VD}(s) = sCR_d I_c(s). \tag{12}$$

式中: R_d 为串联虚拟电阻.

虚拟电阻串电容法后, 逆变器的输出电压表达式为

$$V_{PWM}(s) = V_c(s) + G_{PI}(s) (I^*(s) - sCR_d I_c(s) - I_L(s)). \tag{13}$$

联立式(2)~式(4), 式(12), 式(13)可得, 虚拟阻尼法后 N 台并网逆变器并联时给定电流到并网点电流的传递函数为

$$G_{ILd}^N = G_{ILd}(s) - \frac{NY_{eqd}(s)G_{ILd}(s)}{NY_{eqd}(s) + Y_{grid}(s)}; \tag{14}$$

$$Y_{eqd}^N = \frac{Y_{eqd}(s)Y_{grid}(s)}{NY_{eqd}(s) + Y_{grid}(s)}. \tag{15}$$

式中 G_{ILd} 和 Y_{eqd} 分别表示串联虚拟电阻 R_d 后给定电流至实际电流的传递函数和并联后等效导纳的传递

函数.表达式为

$$G_{\text{lld}}(s) = \frac{G_{\text{PI}}(s)H_3(s)}{1 + H_5(s) + G_{\text{PI}}(s)(sCR_d + 1)H_1(s) + G_{\text{PI}}(s)sCR_dH_3(s)};$$

$$Y_{\text{eqd}}(s) = \frac{H_3(s)H_6(s) - G_{\text{PI}}(s)(sCR_d + 1)H_2(s)H_3(s) + G_{\text{PI}}(s)sCR_dH_4(s)H_3(s)}{1 + H_5(s) + G_{\text{PI}}(s)(sCR_d + 1)H_1(s) + G_{\text{PI}}(s)sCR_dH_3(s)} - H_4(s).$$

图7为串联阻尼后给定电流到网侧电流系数 Bode 图.

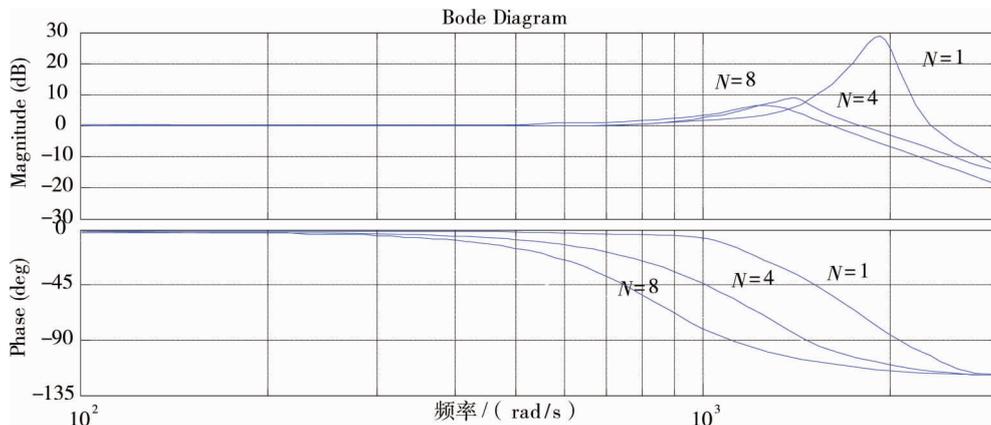


图7 阻尼后给定电流到网侧电流的系数 Bode 图

图7为 $R_d = 11 \Omega$, N 台并网逆变器并联时给定电流到并网点电流传递函数的 Bode 图,由图可得,谐振波峰得到了良好的抑制.

3.2 串联虚拟阻值研究

令式(14)中 $N=8$,当 $G_{\text{lld}}^8 = 1$ 时,虚拟阻值最优.由式(13)可得串联不同虚拟阻值,得到谐振电流情况不同.图8为8台并网逆变器并联运行时串联不同虚拟阻值时给定电流到网侧电流的系数 Bode 图.

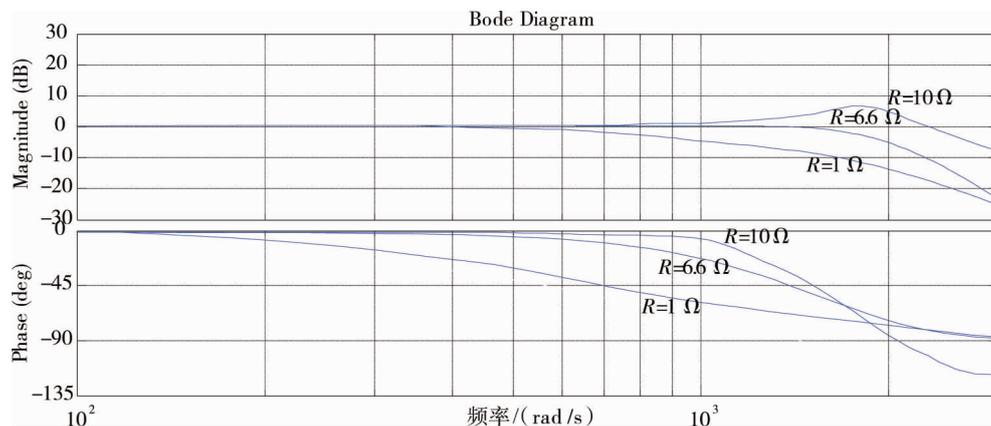


图8 不同阻尼值时给定电流到网侧电流的系数 Bode 图

由图8可知, $R_d = 6.6 \Omega$ 时,传函的 Bode 图与 0 dB 曲线最相似,所以串联该阻值时谐振电流抑制情况最好; $R_d = 10 \Omega$ 时,抑制效果不理想; $R_d = 1 \Omega$ 时,指令电流发生衰减.

4 实验验证

为了验证虚拟电阻串电容算法对并网谐振的抑制效果,采用2台10 kW 光伏并网逆变器进行算法验证及谐振分析,系统参数模拟矿山电力环境,见表1.逆变器并联采用独立控制方式,图9为采用虚拟电阻串电容算法前后的系统输出电流对比波形图,图中 IC 表示1#逆变器滤波电容上的电流, Ig1 为1#逆变器输出电流, Ig2 为2#逆变器输出电流,横坐标表示时间:200 μs /格,纵坐标表示电流值:逆变器输出电流 50 A/格,电容电流 200 A/格.图9a为未采用虚拟阻值时系统电流输出波形,图9b为采用虚拟阻值后系统

电流输出波形.

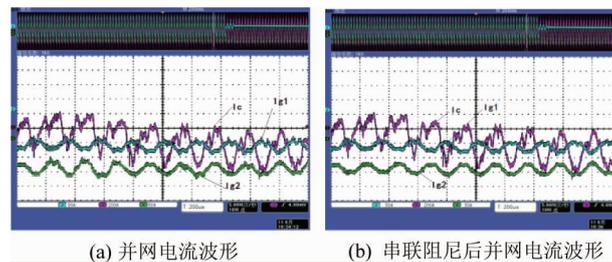


图9 系统输出电流波形

图10为采用虚拟阻值前后系统频谱分析图.图10a为未采用虚拟阻值时系统频谱分析,图10b为采用虚拟阻值后系统频谱分析,通过图10分析可得,采用虚拟电阻串电容算法后系统谐振得到明显抑制.图10b中仍然存在少量低次谐波,这是由于电网电压谐波导致的.

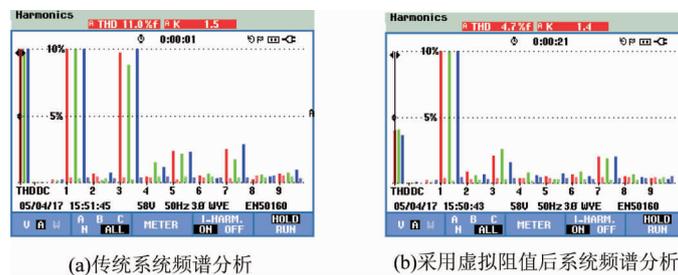


图10 系统频谱分析

五 总结

- 1) 随着并联数 N 的增大, 谐振波峰频率逐渐下降, 若谐振频率与网侧电流频率相近时, 会增大电流谐波.
- 2) 串联虚拟阻尼值为最优阻值时, 系统谐振电流抑制情况良好.

参考文献:

- [1] 王斯成. 加速发展光伏发电保障中国能源的可持续发展[J]. 中国工程科学, 2011, 13(9): 51-62.
- [2] 周林, 解宝, 郑晨, 等. 单相并网 LCL 型逆变器的改进设计方案[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 211-219.
- [3] 刘飞, 查晓明, 段善旭. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的参数设计与研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 110-116.
- [4] Wang F, Duarte J L, Hendrix M A M, et al. Modeling and analysis of grid harmonic distortion impact of aggregated DG inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 786-797.
- [5] 严干贵, 常青云, 黄亚峰, 等. 弱电网接入下多光伏逆变器并联运行特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 933-940.
- [6] 江法洋, 郑丽君, 宋建成, 等. LCL 型并网逆变器重复双闭环控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2944-2954.
- [7] 陈慧, 吴新科, 彭方正. 具有串并联自调整型倍流整流结构的交错并联移相全桥变流器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 434-441.
- [8] He J, Li Y, Bosnjak D, et al. Investigation and Active Damping of Multiple Resonances in a Parallel-Inverter-Based Microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [9] Li Y W. Control and Resonance Damping of Voltage-Source and Current-Source Converters With LC Filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1511-1521.
- [10] 陈新, 韦微, 胡雪峰, 等. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的研究及新型有源阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 71-79.
- [11] 苏建徽, 施永. 并网逆变系统滤波电路拓扑及其谐振抑制方法研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(9): 1619-1625.