

页岩气田电网谐波谐振影响分析及对策研究

李书应¹, 刘 奇¹, 康忠健², 李 雷²

(1. 中石化重庆页岩气有限公司, 重庆 408400; 2. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 基于“碳达峰、碳中和”背景, 新型大功率压缩机、网电钻机及电驱压裂泵系统的研制、使用为我国页岩油气田电动、绿色和智能开发提供了新的装备支撑。然而系统中变流、变频装置也使得页岩气田电网的谐波污染问题愈发严重, 极易引发谐波谐振问题。为此针对页岩气田电网的谐波谐振进行综合分析治理。首先, 阐明页岩气田压缩机、网电钻机及电压裂泵系统变频装置的工作机理; 其次, 采用模态分析法对由变频装置引发的页岩气田电网谐波谐振问题进行分析, 得到最易诱发谐波谐振的平台区域; 最后, 根据不同的电压等级在所得区域中加装无源或有源滤波器对谐波谐振进行抑制。该研究成果可以准确检测变频装置引发的谐波谐振区域并进行有效抑制, 具有良好的应用前景, 将为我国页岩气绿色、低成本开发示范提供保障。

关键词: 页岩气田配电网; 谐波谐振; 模态分析法; 无源滤波器; 有源滤波器

Harmonic resonance analysis and management of shale gas distribution network with phased load

LI Shuying¹, LIU Qi¹, KANG Zhongjian², LI Lei²

(1. Sinopec Chongqing Shale Gas Co., Ltd., Chongqing 408400, China;

2. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Based on the background of achieving carbon peaking and carbon neutrality, the development and application of new high-power compressors, electric grid drilling RIGS and electric fracturing pump system provide new equipment support for the electric, green and intelligent development of shale oil and gas fields in China. However, the harmonic pollution of shale gas grid becomes more serious due to the converter and frequency conversion device in the system, which easily causes harmonic resonance problem. Therefore, the harmonic resonance of shale gas grid is comprehensively analyzed and treated. Firstly, the working mechanism of compressor, electric drilling rig the harmonic impedance model of electric fracturing pump system is established. Secondly, the main research methods of harmonic resonance analysis are introduced, and the basic principle of modal analysis is explained. Modal analysis method was used to analyze. Finally, harmonic resonance is suppressed. The results show that there may be multiple resonant frequency points in the distribution network changes, but these changes are relatively clear, if the original resonant frequency point of the resonant loop does not exist, the resonant frequency point disappears. The optimal configuration strategy of passive filter can effectively suppress harmonic resonance of distribution network in shale gas field.

Key words: shale gas distribution grid; harmonic resonance; modal analysis method; passive filter; active power filter

0 引言

据统计,中国页岩气的存储量约占全世界的1/5,具有良好的勘探开发前景^[1]。对于我国页岩气开采的压裂施工作业,目前普遍采用的是柴油机驱动的压裂泵车组的工作模式,这已成为我国改造低渗透油气藏和开发非常规油气藏的主要手段^[2-3]。现有的常规压裂泵车组的作业模式已越来越不能满足我国对页岩气开采的“高功率、大排量、绿色和智能化”的要求。开发一种大功率的电驱动压裂泵系统可有效地解决上述问题。电驱动压裂泵系统基本原理是将现代电力电子技术与电动机控制技术相结合,通过电动机取代传统的柴油发电机直接驱动压裂泵工作^[4]。系统的拓扑结构一般采用交-直-交的供电模式,前端从10 kV电网取电,通过移相变压器、整流器和变频器输出三相可变压变频的交流电驱动电动机旋转,从而带动电压裂泵工作^[5]。

然而随着带有变频、变流装置大量投入使用,页岩气田配电网的谐波污染问题愈发严重。当电网中存在的谐波频率和系统谐振频率接近时,可能诱发系统谐波谐振,导致节点谐波过电压,同时放大支路谐波电流,导致系统母线节点谐波电压与支路谐波电流的严重畸变^[6],进而造成电气设备的绝缘损坏、增大变压器和旋转电动机等设备的损耗及干扰通信信号等危害,严重影响页岩气田的安全可靠运行。

针对页岩气田电网,电泵压裂等阶段性负荷与常规负荷并行是其主要特点,当这些大型用电设备、变频设备进行投运时,易对电网造成不利影响,致使供电系统不稳定,引发电网故障,进而导致平台停产,影响页岩气的产量,造成较大的经济损失。电泵压裂作为近年来国家大力发展的清洁能源开发技术,具有广阔的应用前景,页岩气田关于此类阶段性负荷的运行模式对全国乃至世界具有重要的借鉴意义,如何保证此模式下配电网安全稳定运行,具有重要的理论意义及实际应用价值。

本文首次对带有电泵压裂这种阶段性负荷的

页岩气田配电网进行谐波谐振故障机理与治理措施研究。作业负荷与生产负荷并行是页岩气田供电的主要特点,该种运行方式在国内尚属首次。本文对该运行方式下谐波谐振故障机理与抑制措施进行了研究,通过仿真证明了其有效性,研究成果可为大型页岩气田谐波谐振控制提供一种新的解决方案,以消除负荷并行对电网造成的干扰,保障电网的稳定性,满足了页岩气田开发中期的实际需要,针对性强,具有广阔的推广应用前景。

1 页岩气田电网谐波源工作原理介绍

页岩气田大功率压缩机、网电钻机及电压裂泵等阶段性负荷中变频、变流装置的使用,使得页岩气田配电网的谐波污染问题愈发严重。对所采用的6脉波及36脉波整流器工作原理及谐波特性进行分析,为由此引起的谐波谐振分析奠定基础。

1.1 压缩机、网电钻机变频器工作原理

变频器(Variable-Frequency Drive, VFD)是应用变频技术与微电子技术,通过改变电动机工作电源频率方式来控制交流电动机的电力控制设备^[7]。6脉波变频器拓扑结构如图1所示。

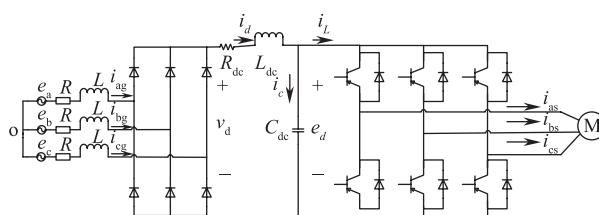


图1 6脉波变频器拓扑结构

Fig. 1 Topology of 6 pulse frequency converter

变频器的拓扑结构可以采用二极管钳位(NPC)三电平结构,电动机控制采用V/F控制策略。其技术应用广泛,积累了大量的产品应用经验,对后面保障压裂系统的可靠性至关重要^[8]。

采用的逆变器控制包括转速控制和空间矢量调节,V/F控制的数学逻辑图如图2所示。

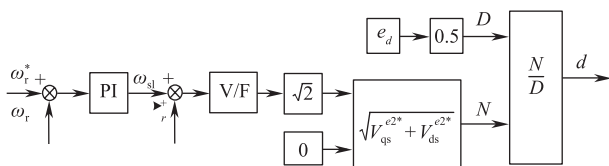


图 2 V/F 控制的数学逻辑示意图

Fig. 2 Mathematical logic diagram of V/F control

感应电动机的输入有功功率为

$$P_{\text{IM}} = \frac{3}{2}(v_{\text{ds}}i_{\text{ds}} + v_{\text{qs}}i_{\text{ds}}) \quad (1)$$

逆变器的输入功率为

$$P_{\text{IN}} = e_d i_l \quad (2)$$

6脉波整流器接入平台母线电流频谱图仿真结果如图3所示。

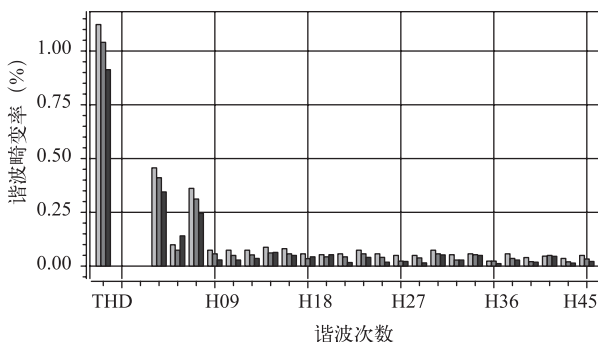


图3 6脉波整流器接入平台母线电流频谱图仿真结果

Fig. 3 Simulation results of bus current spectrum of 6 pulse rectifier access platform

1.2 电压裂泵变频器工作原理

压裂泵设备的主要要求是高压、大排量、大规模和长时间工作^[9]。因此,单车马力大且要求具有高度的可靠性,压裂泵一般采用间歇式工作制,如进行连续工作时,一般要求平均工作压力比不超过60%,平均功率利用率不超过60%。

用于压裂泵电驱系统的变频器主电路结构为串联36脉波二极管不控整流加基于二极管钳位三电平拓扑逆变桥的六相电动机方案。其主电路拓扑如图4所示。

图4中, 电路结构主要由三相10 kV电压源 u_0 、1台36脉波移相变压器T、6个三相不控整流器(其中 B_1 和 B_2 串联, B_3 和 B_4 串联, B_5 和 B_6 串联)、3个三电平NPC逆变器(N_1 、 N_2 和 N_3)及1台六相异步电动机组成。其中前端6个6脉波不

控整流器通过级联方式由一台具有6个二次绕组的36脉波移相变压器供电,以达到降低网侧谐波的目的。串联的整流器输出实现母线电压的设定值,其中点O接到NPC三电平的中性点,实现中性点电压的硬件钳位。

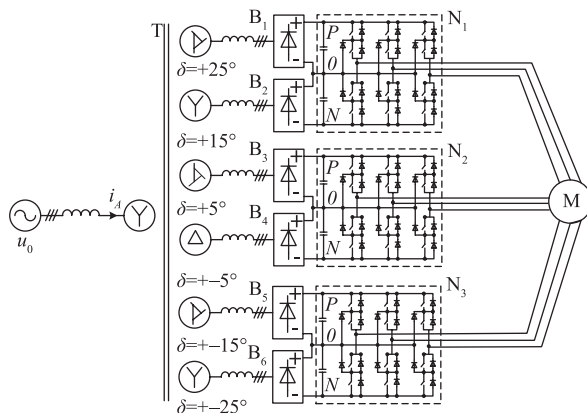


图4 电压裂泵系统主电路

Fig. 4 Main circuit of electric fracturing pump system

通过数学推导得出整流电路通用公式为

$$u_{\text{da}} = U_{\text{d0}} [1 - \sum_{n=mk}^{\infty} \frac{2 \cos k\pi}{2n-1} \cos n\omega t] \quad (3)$$

当取 $m=2$, 代入式(3), 得

$$u_{\text{da}} = \sqrt{2}u_2 \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} [1 + \frac{2}{2 \times 4} \cos 2\omega t + \frac{2}{3 \times 5} \cos 4\omega t + \frac{2}{5 \times 7} \cos 6\omega t + \dots] \quad (4)$$

当取 $m=6$ ，代入式(3)，得

$$u_{\text{da}} = \sqrt{2}u_{2L} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \left[1 + \frac{2}{5 \times 7} \cos 6\omega t + \frac{2}{11 \times 13} \cos 12\omega t + \frac{2}{17 \times 19} \cos 18\omega t + \frac{2}{23 \times 25} \cos 24\omega t + A \right] \quad (5)$$

从12脉波整流傅里叶级数展开可看到两个整流桥, 谐波互相抵消, 只剩下 $(12k \pm 1)$ 次, k 为正整数, 对36脉波只剩下 (36 ± 1) 次, 36脉波以上的脉波对谐波的抑制已不起多大作用, 所以选用36脉波可得到最大的性价比。电压裂泵接入平台母线电流频谱图仿真结果如图5所示。

接入电压裂泵系统后,交流侧电流的总谐波畸变率为3.49%,高次谐波中35、37次谐波含量为0.21%、0.22%。电压的总谐波畸变率为3.55%,但是谐波频率分布特点与电流有所差

别,电压低次谐波含量普遍比电流的低,主要谐波成分集中在35、37次。在一定条件下,某些频率的谐波成分会增大,出现谐波振荡现象。

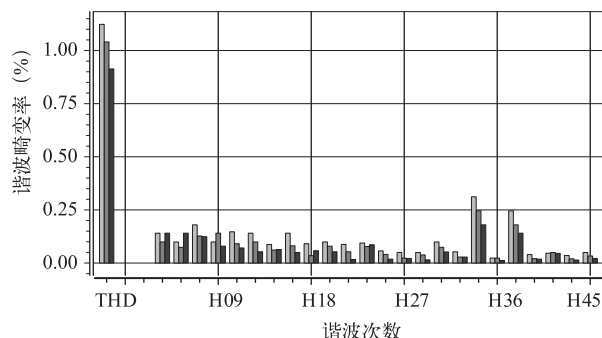


图5 电压裂泵接入平台母线电流频谱图仿真结果

Fig. 5 Electric simulation results of busbar current spectrum of electric fracturing pump access platform

2 页岩气田电网谐波谐振分析

2.1 谐波谐振理论分析

在含有电阻、电感和电容的交流电路中,电路两端的电压与其电流一般是不相同的,若电路参数或电源频率使电流与电源电压相同,电路呈电阻性,此状态则成为谐振。谐振可分为串联谐振和并联谐振,在电力系统配电网中一般发生并联谐振。简单的谐振回路如图6所示。

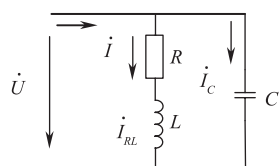


图6 谐波谐振回路

Fig. 6 Harmonic resonance loop

图6中回路阻抗值为

$$Z = \frac{(R + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{\frac{CR}{L} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})} \quad (6)$$

如果电路发生谐振,必定 I 和 U 同相,及回路总电抗为零,此时并联谐振时阻抗最大,即

$$Z = \frac{L}{CR} \quad (7)$$

谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

由式(8)可知,电路中电感 L 与电容 C 的乘积越大,谐振频率越小。

2.2 针对页岩气田电网的谐波谐振模态分析

针对页岩气田配电网的模态分析法,通过对模态阻抗进行扫描来确定谐振频率点,并确定特征向量和参与因子,以对谐振问题进行监测和抑制^[10]。

针对页岩气田配电网的模态分析法步骤:

1) 按大小将特征值进行升序排列,求出确定的谐振频率下的配电网节点导纳矩阵的特征值矩阵,即

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \lambda_i \\ \lambda_j \\ \vdots \\ \lambda_p \end{pmatrix} \quad (9)$$

2) 找到最高激发节点的可行解,即前 m 个最小特征值对应的关键右特征向量 $[R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{in}]$ 、 $[R_{j1}, R_{j2}, \dots, R_{jn}]$ 、...

3) 找出在谐振频率下发生谐振的最高激发节点可行解中拥有最大阻抗值(标么值)的模态为关键模态。

4) 由关键模态确定最高观测节点及相应的参与因子。

针对页岩气田配电网的模态分析法计算流程如图7所示。

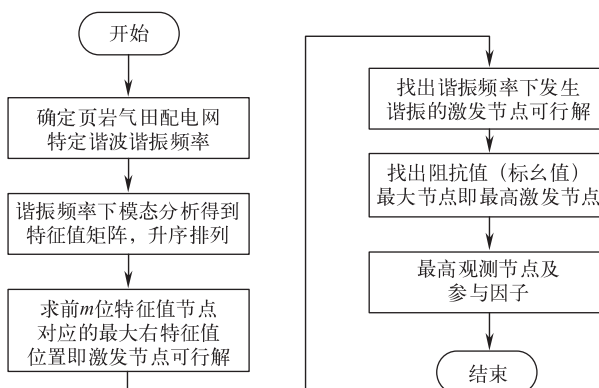


图7 针对页岩气田配电网的模态分析法计算流程

Fig. 7 Calculation flow of modal analysis method for distribution network in shale gas field

按照以上过程对整个页岩气田配电网进行模态分析,其结果见表1。

表1 某页岩气田配电网模态分析结果

Tab. 1 Single tuned filter optimization configuration parameters

谐振频率/ f/Hz	励磁节点	观测节点	参与因子	
			大小	位置
360	DP31	DP31	0.109 3	DP31
	DP33	DP33	0.105 0	DP33
	DP1	DP1	0.099 4	DP1
	DP23	DP23	0.092 3	DP23
	DP33	DP33	0.091 1	DP33
532	DP18	DP18	0.087 6	DP18
	DP9	DP9	0.083 2	DP9
	DP36	DP36	0.071 2	DP36
	DP31	DP31	0.108 5	DP31
	DP23	DP23	0.107 3	DP23
620	DP1	DP1	0.098 6	DP1
	DP12	DP12	0.095 2	DP12
	DP20	DP20	0.089 5	DP20
1720	DP36	DP36	0.108 9	DP36

由表1可知,360 Hz时最佳励磁节点、观测节点均是DP31,即装有压缩机变频设备的平台;532 Hz时最佳励磁节点、观测节点均是DP33,620 Hz时最佳励磁节点、观测节点均是DP31,1 720 Hz时最佳励磁节点、观测节点均是DP36,即装有36脉波整流装置的电压裂泵平台,励磁节点、观测节点相同,且与参与因子相对应,参与因子越大,越容易激发谐振。

3 页岩气田电网谐波谐振综合治理研究

针对页岩气田电网谐波谐振问题,采用综合治理方案,对电压裂泵平台带载母线电压等级较高,从经济性的角度考虑,选择单调滤波器对电压裂泵变频器部分进行滤波;对压缩机平台带载母线电压等级较低,为了消除变频装置产生的谐波,选择有源滤波器进行滤波。

页岩气田配电网谐波谐振综合抑制步骤:

1) 根据页岩气田配电网谐波谐振模态分析方法确定谐波谐振频率、谐振最高激发节点。

2) 在谐振最高激发节点配置滤波器,若节点带载电压等级高于0.6 kV,设置无源滤波器容

量初值 Q_{L0} 及容量步长 ΔQ ;若节点带载电压等级低于0.6 kV,设置有源滤波器容量初值 Q_{L0} 及容量步长 ΔQ ,得到配置滤波器后的网络节点导纳矩阵。

3) 确定配置滤波器后网络的谐波谐振频率、谐振最高激发节点。

4) 根据谐波源频率与配置滤波器后的系统谐振频率相接近来判断滤波器的参数设计是否合理,若不合理会造成谐波谐振放大,需要重新设计。

5) 重新设计滤波器的参数,使谐波源频率与配置滤波器后的系统谐振频率不再接近。

页岩气田配电网谐波谐振抑制过程如图8所示。

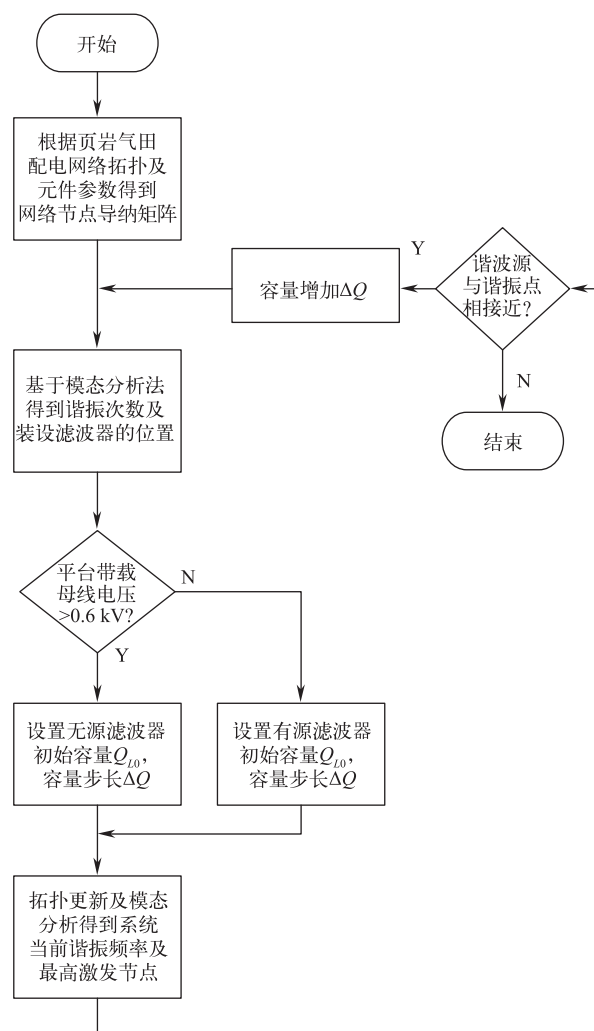


图8 页岩气田配电网谐波谐振抑制流程

Fig. 8 Flow of harmonic resonance suppression in shale gas distribution network

3.1 电压裂泵谐波谐振抑制

针对电压裂泵平台带载母线电压等级较高，从经济性的角度考虑，选择单调滤波器对电压裂泵变频器部分进行滤波。

确定单调谐滤波器的无功补偿容量，则电容器容量为

$$Q_C = \frac{h^2 - 1}{h^2} Q_F \quad (10)$$

电容基波容抗为

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} \quad (11)$$

电感基波电抗为

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (12)$$

串联电阻为

$$R = \frac{hX_L}{Q} \quad (13)$$

确定无源滤波器参数后，由2.2节分析，在谐振最高激发点依次配置无源滤波器，并得到增加无源滤波器后的页岩气田配电网节点导纳矩阵，即

$$\Delta Y = \begin{pmatrix} 0 & & \dots & & 0 \\ \vdots & \frac{1}{R_{LC1} + j(hX_{L1} - \frac{X_{C1}}{h})} + \dots + \frac{1}{R_{LCM} + j(hX_{LM} - \frac{X_{CM}}{h})} & & & \vdots \\ 0 & & \dots & & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

应用模态分析法分析设置无源滤波器后的页岩气田配电网节点导纳矩阵，确定谐振频率以及谐振最高激发点。当配置无源滤波器后的系统谐振频率与相应的励磁源频率相接近时，会引发新的谐波谐振，造成谐波谐振放大，表明滤波器设置不合理。增加滤波器的容量，重新设计滤波器的参数，并再次进行校验，直至不再出现励磁源频率与配置无源滤波器后的系统谐振频率相接近的情况。

3.2 压缩机、网电钻机谐波谐振抑制

针对压缩机、网电钻机平台带载母线电压等级较低，为了消除变频装置产生的谐波，选

择有源滤波器进行滤波。注入式混合有源滤波器（Hybrid Active Power Filter, HAPF）的拓扑结构如图9所示。注入支路有效地降低了直流侧电容的容量，可以作为针对电压裂泵的新型谐波治理装置。

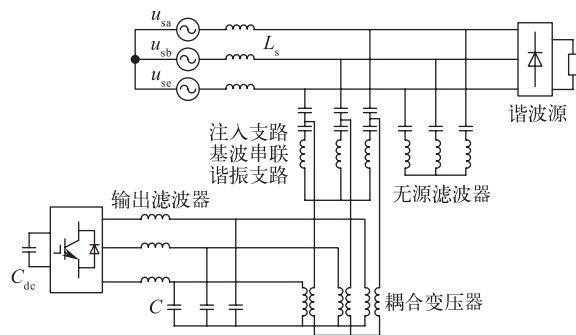


图9 注入式混合滤波器的拓扑结构

Fig. 9 Topology of injection hybrid power filter

对于页岩气田电网中的压缩机及网电钻机系统，由于其电压等级较低，采用有源滤波器就地补偿方法滤除谐波，有源滤波器容量电流为

$$I_h = 1.3K I_N \times \frac{\text{THD}_i}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}} \quad (15)$$

式中， I_N 为设备的额定电流； K 为负载率； THD_i 为负载电流畸变率。

4 实例仿真

以重庆市南川区页岩气田配电网为例，对该页岩气田电网中谐波谐振问题进行分析。该页岩气田配电网如图10所示，经由220 kV、110 kV变电站，每条线路下带有若干分支线路，依次为各采气、压裂及钻井平台供电。

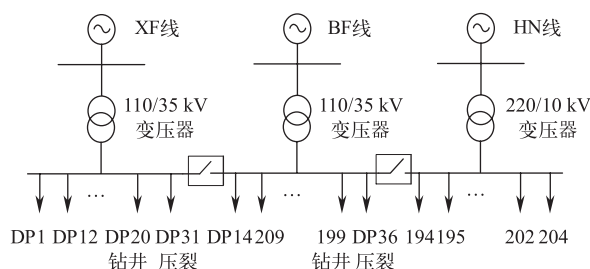


图10 南川页岩气田配电网示意图

Fig. 10 Schematic diagram of distribution network in shale gas field

4.1 南川页岩气田配电网谐波谐振分析

对整个页岩气田配电网进行扫频，仿真结果如图11所示。

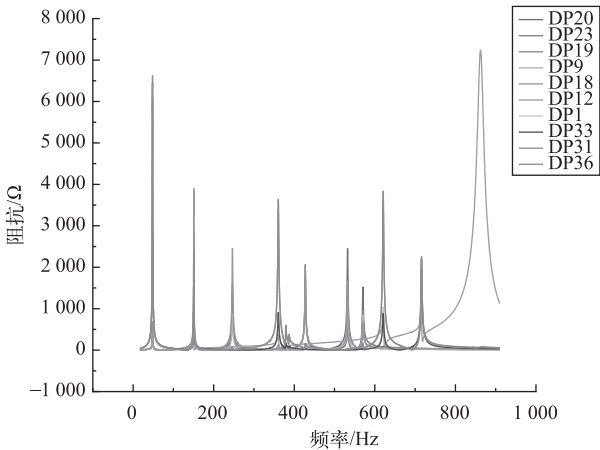


图 11 页岩气田配电网谐波谐振仿真图
Fig. 11 Harmonic resonance simulation diagram of distribution network in shale gas field

由图11可知，页岩气田电网中5、7、11、13和35谐波，确定容易引发谐振过电压的谐振频率为360 Hz、532 Hz、621 Hz及1 725 Hz，与表1中的结果一致。

4.2 南川页岩气田配电网谐波谐振治理

由4.1分析得到参与因子较大的平台，根据其电压等级选择无源或有源滤波装置，对谐波进行治理。针对电压裂泵平台，带载母线电压等级较高，从经济性的角度考虑，选择单调滤波器对电压裂泵变频器部分进行滤波。针对压缩机平台，带载母线电压等级较低，为了消除变频装置产生的谐波，选择有源滤波器进行滤波。

单调谐滤波器优化配置参数见表2。

表 2 单调谐滤波器优化配置参数
Tab. 2 Single tuned filter optimization configuration parameters

节点	滤波频率 /Hz	滤波器容量 /kvar	品质因数
DP36	573	550	30
电阻值 /Ω	电容值 /μF	电感值 /mH	额定电压 /kV
0.005 891	10 904.13	0.032 076	0.4

在该页岩气田配电网DP36平台配置滤波器，加入优化配置的滤波器前后，其阻抗频率特性曲线如图12所示。

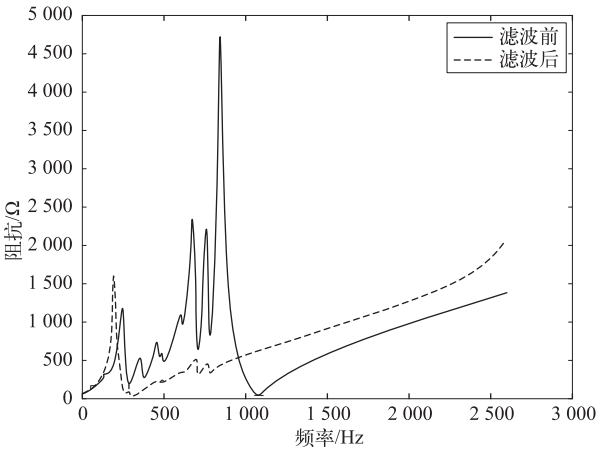


图 12 计及电压裂泵的页岩气田配电网加入滤波器前后 DP36 节点阻抗频率特性曲线
Fig. 12 Impedance frequency characteristic curve of node DP36 before and after adding the filter in shale gas distribution network considering electric fracturing pumps

图12中实线表示未加滤波器时DP36节点阻抗频率特性曲线。从图12中可以看出，加入优化配置的滤波器后，不会造成谐波放大，且节点阻抗值明显减小。加入滤波器前后DP36节点谐波谐振分析结果见表3。

表 3 加入滤波器前后 DP36 节点谐波谐振分析结果
Tab. 3 Harmonic resonance analysis results of node DP36 before and after adding the filter

	频率 /Hz	节点	节点阻抗 /Ω
滤波前	573	DP36	4720
滤波后	573	DP36	423.225

由表3可知，加入优化配置的滤波器后，573 Hz时，该节点的阻抗423.225 Ω与滤波前该节点的阻抗4 720 Ω相比很小。表明表3中的滤波器配置方案能有效抑制计及电压裂泵的页岩气田配电网中谐波谐振的发生。

压缩机、网电钻机有源滤波器参数设置见表4、表5。

表 4 压缩机有源滤波器参数设置
Tab. 4 Compressor active filter parameter setting

压缩机 额定功 率 /kW	压缩机 额定电压 / V	负载 率 (%)	总电流 畸变率 (THD _i)	谐波 电流 / A	可靠 系数	容量 / A
315	380	82	0.32	109.9	1.3	142.87
160	380	82	0.32	55.8	1.3	72.54

表 5 网电钻机有源滤波器参数设置

Tab. 5 Parameter setting of active filter of electric rig

网电钻机 额定功率 /kW	网电钻机 额定电压 /V	负载 率 (%)	总电流 畸变率 (THD _i)	谐波 电流 / A	可靠 系数	容量 /A
1 300	600	82	0.35	123.6	1.3	130.45

压缩机平台加入滤波器前后DP12节点阻抗频率特性曲线如图13所示。

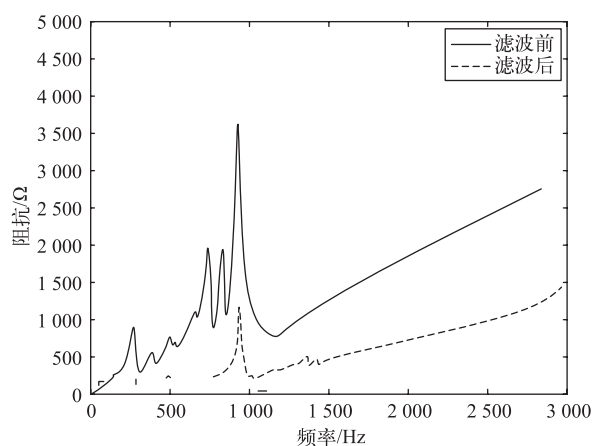


图 13 压缩机平台加入滤波器前后 DP12 节点阻抗频率特性曲线
Fig. 13 Impedance frequency characteristic curve of node DP12 before and after adding the filter in compressor platform

从图13中可以看出加入优化配置的滤波器后，在谐振频率下节点阻抗值明显减小，且不会造成谐波放大的情况。

5 结束语

针对页岩气田配电网谐波谐振问题，建立了内部各元件的谐波阻抗模型，重点考虑了网电钻机、电压裂泵的谐波阻抗特性，并介绍了谐波谐振问题分析的主要方法，以国内某页岩气田为例，采用模态分析法对其进行了分析。

1) 在页岩气田压缩机平台、网电钻机平台以及电压裂泵平台变频器中5、7、13、15、35及37次谐波的影响下，平台的谐振阻抗值较大，容易诱发电网的谐波谐振过电压。

2) 对于压缩机、网电钻机平台，由于负载电压等级较低，采用有源滤波器能够有效滤除谐波，降低系统谐振过电压；对于压裂平台，由于负载电压等级较高，且考虑到成本问题，采用无

源滤波装置滤除特定频率的谐波，可以降低谐波对平台的影响。

参考文献

- [1] 聂海宽, 何治亮, 刘光详, 等. 中国页岩气勘探开发现状与优选方向[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 13-35.
- [2] 闫存章, 黄玉珍, 葛春梅, 等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 1-6.
- [3] 彭俊威, 周青, 戴启平, 等. 国内大型压裂装备发展现状及分析[J]. 石油机械, 2016, 44(5): 82-86.
- [4] 马钊, 赵志刚, 孙媛媛, 等. 新一代低压直流供电系统关键技术及发展展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 12-22.
- [5] 刘莹, 刘创华, 方琼. 串联型H桥级联多电平电压扰动发生器[J]. 电力电子技术, 2019, 53(11): 114-117.
- [6] 杜少通. 谐波抑制与无功补偿关键技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [7] 刘晓曦. 基于改进自适应延时滤波的并网逆变器控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [8] 刘晓卓. 油田低压电网谐波分析及治理[J]. 电世界, 2018, 59(06): 33-35.
- [9] RAHMANI S, HAMADI A, AL-HADDAD K. A Lyapunov-function-based control for a three-phase shunt hybrid active filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 59(3): 1418-1429.
- [10] 李岩, 邹常跃, 饶宏, 等. 柔性直流与极端交流系统间的谐波谐振[J]. 中国电机工程学报, 2018, (增刊1): 19-23.

作者简介

李书应(1968—), 男, 高级工程师, 研究方向为地球物理勘探勘察。

(收稿日期: 2022-05-30)