

静止变频器系统分数次谐波分析

石祥建¹, 司红建², 吴小放², 闫伟¹, 牟伟¹, 施一峰¹

(1.南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211102; 2.江苏沙河抽水蓄能发电有限公司, 江苏溧阳 213333)

摘要:通过搭建静止变频器(SFC)系统矩阵实验室(MATLAB)双闭环仿真模型,研究了SFC系统运行参数对分数次谐波的影响。分析发现,总的谐波畸变率(THD)随着回路电流的增大而减小,随着电源电压的升高而增加,分数次谐波含量也有类似的变化规律,其原因在于换相重叠角的改变;分数次谐波次数与机桥输出频率密切相关。通过类比的方法,推导分数次谐波与机桥输出频率的简化关系式,并通过仿真验证其可用性。

关键词:分数次谐波;静止变频器;MATLAB仿真;运行参数

中图分类号: TN773

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)05-0036-04

静止变频器(SFC)是大型抽水蓄能电站机组水泵工况运行时的主要起动设备,其安全稳定运行对整个抽水蓄能电站的正常生产至关重要。研究表明,SFC工作的时候除了会产生谐波(整数次),对电网造成污染外^[1],还会产生分数次谐波。分数次谐波会引起铁心电感元件过流,导致器件绝缘严重损坏,甚至引起爆炸,严重影响电力系统的安全稳定运行^[2,3]。分数次谐波对电动机的噪声和振动影响很大。如果与电机“圆周振型”阶数上耦合较深,就会产生很强的噪声和振动^[4]。文中搭建了矩阵实验室(MATLAB)仿真模型,在不同电源电压、回路电流、控制角、机桥输出频率等参数下,对SFC系统电源侧的分数次谐波进行了研究。

1 SFC 分数次谐波产生原理

SFC是由电力电子器件组成的变速传动设备,是典型的谐波源,除了产生整数次谐波,还能产生分数次谐波。SFC变频器属于电流型的变流器。

对于电流型变频电路的谐波分析,通常只考虑直流侧对电源侧的作用,而忽略逆变器输出交流侧通过直流环节对电源侧的影响。一般认为,在整流电路输出直流电流时,开关器件的换相使得在电源侧产生谐波电流。 p 脉动整流回路特征谐波如下:

$$f_i = (pm \pm 1)f_1 \quad (1)$$

式中: p 为整流桥脉动数; m 为1,2,3……; f_i 为谐波频率; f_1 为整流桥输入频率。

实际上,在SFC起动过程中,逆变桥输出可变频率的交流电流到电机侧,同时六脉动逆变电路在直流侧产生了6倍输出频率的脉动分量,在直流电流中表现为纹波电流。对于电源侧来说,这些纹波电流通过工频相控整流电路开关操作的耦合,被工频分量调制产生分数次谐波。

Gunther E W等人研究发现,谐波与输出频率的关系如下^[5]:

$$f_i = (p_1 m \pm 1)f_1 \pm p_2 n f_0 \quad (2)$$

式中: p_1 为整流桥脉动数; p_2 为逆变桥脉动数; f_i 为谐波频率; f_1 为整流桥输入频率; f_0 为逆变桥输出频率; m 为0,1,2,3……; n 为0,1,2,3……。 m, n 不同时为0。

式(2)给出了SFC系统电源侧完整谐波情况。通过 m, n 值的改变,可以得到很多次分数次谐波。通常在工程实际计算中,仅需考虑谐波含量中的主要分量,在满足工程需要的前提下,尽量简化计算。

在科学研究中,类比是一种重要的方法。以六脉动整流回路特征谐波分析为例,六脉动特征谐波满足公式:

$$f_i = (6m \pm 1)f_1 \quad (3)$$

特征谐波虽然有5次,7次,11次,13次,23次,25次,但含量最多的还是5次和7次。分数次谐波也一样,含量较大的仍是次数较低的分数次谐波,即 m 的取值要尽量小,谐波次数要尽量小。因此,简化式(2)的原则为:(1) m, n 的取值尽量小;(2)分数次谐波的次数尽量小。

在SFC系统运行过程中,通常 $f_0 < f_1$,为了得到较小谐波次数,取 $m=0, n=1$,简化计算公式如下:

$$f_i = f_1 \pm 6f_0 \quad \text{当 } f_0 \leq 8.3 \text{ Hz} \quad (4)$$

$$f_i = 6f_0 \pm f_1 \quad \text{当 } f_0 > 8.3 \text{ Hz} \quad (5)$$

文中将根据SFC系统仿真结果,验证简化公式的可用性。

另外,换相重叠角 r 的计算公式如下:

$$r = -\alpha + \cos^{-1} \left(\cos \alpha - \frac{2X_r I_d}{\sqrt{2} E} \right) \quad (6)$$

式中: r 为换相重叠角($^\circ$); α 为控制角($^\circ$); X_r 为从电源到桥之间的每相等值电抗,又叫换相电抗,

Ω ; I_d 为直流电流, A; E 为电源线电压, V。

2 模型搭建

电力系统中最重要非线性负荷是功率换流器。SFC 就是换流器的一种。由于电力电子装置的非线性、时变性,传统分析方法已不能满足其静态、动态特征分析的要求,而计算机仿真以其投资少,周期短,灵活方便的优势成为一种有效手段。文中采用 MATLAB 仿真软件建立 SFC 系统仿真模型,对分数次谐波进行分析。

2.1 设备参数

对某抽水蓄能电站静止变频器的实际参数进行 MATLAB 仿真,静止变频器拓扑结构如图 1 所示,主要设备参数如表 1 所示。

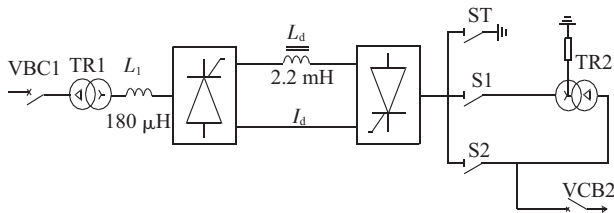


图 1 静止变频器拓扑结构

表 1 静止变频器主要参数

| 设备 | 参数 |
|-------|---------------------------------------|
| 电源电压 | 10.5 kV |
| 输入变 | 容量 4 MV·A; 变比 10.5 kV/1.4 kV; 短路阻抗 9% |
| 输出变 | 容量 4 MV·A; 变比 10.5 kV/1.4 kV; 短路阻抗 9% |
| 直流电流 | 1 883 A |
| 平波电抗器 | 2.2 mH |
| 机组容量 | 59.2 MV·A |

2.2 SFC 控制原理

静止变频器实现机组由静止状态拖动到额定转速、并网的全部过程控制。静止变频器仿真的控制原理如图 2 所示。

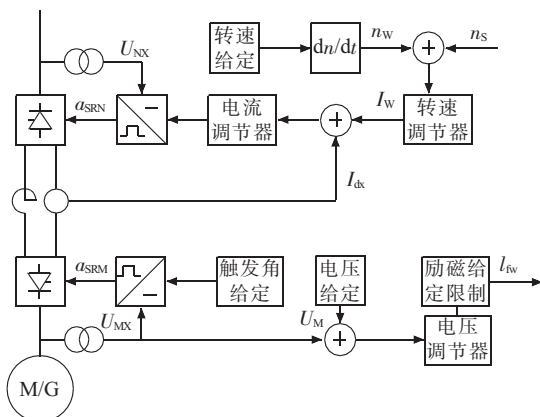


图 2 静止变频起动的控制原理

SFC 起动过程中,处于逆变工作方式的换流桥 SRM 采用定角度开环控制。换流桥 SRN 为整流工

作方式,它受控与转速和电流的双闭环调节系统。电流环为内环,转速环为外环。

变频起动时,首先由转速给定单元输出一个与电网频率相当的转速基值,在 dn/dt 环节作用下,产生转速给定值 n_w ,并与机组实际转速 n_s 比较,其偏差量作为转速调节器的输入,而转速调节器的输出作为电流调节器的输入,最终调整换流桥 SRN 的控制角以控制变频器回路的电流,使机组快速跟踪转速指令变化。

3 结果分析

文中设计多种工况,研究 SFC 系统分数次谐波随电源电压、回路电流、控制角、机桥输出频率等参数的变化情况。采用傅里叶级数进行谐波分析。

3.1 电源电压的影响

为了研究电源电压对分数次谐波的影响,设计如下工况:(1) 电机转速保持基本不变(端电压频率 40 Hz);(2) 改变电源电压,研究分数次谐波的情况。结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同电源电压下谐波次数和含量及总的谐波畸变率

| 电压 /kV | 特征谐波次数及含量 /% | | | | THD /% |
|--------|--------------|------|------|------|--------|
| | H5 | H7 | H11 | H13 | |
| 9.5 | 21.65 | 9.96 | 6.36 | 4.82 | 25.15 |
| 10.5 | 22.85 | 9.33 | 7.09 | 4.87 | 26.15 |
| 11.5 | 23.89 | 8.65 | 7.66 | 4.75 | 26.96 |

由表 2 可知,随着电源电压的升高,总的谐波畸变率(THD)随之变大。由式(6)可知,当控制角不变,换相电抗不变,直流电流不变时,随着电源电压的升高,换相重叠角减小。SFC 交流进线电流波形更接近方波,总的谐波畸变率升高。

表 3 不同电源电压下分数次谐波次数及含量

| 电压 /kV | 分数次谐波次数及含量 | | | | | |
|--------|------------|------|-----|------|-----|------|
| | Ih1 | % | Ih2 | % | Ih3 | % |
| 9.5 | 3.8 | 4.15 | 5.8 | 3.15 | 8.0 | 1.86 |
| 10.5 | 3.8 | 4.26 | 5.8 | 3.44 | 8.0 | 1.07 |
| 11.5 | 3.8 | 4.57 | 5.8 | 3.33 | 8.0 | 1.31 |

由表 3 可知,随着电源电压的升高,分数次谐波次数不变,分数次谐波含量大致呈上升趋势。分数次谐波含量升高也源于换相重叠角的减小。分数次谐波次数不变,说明电源电压改变对分数次谐波次数没有影响。

3.2 回路电流的影响

为了研究回路电流大小对分数次谐波的影响,设计如下工况:(1) 电机转速保持基本不变(端电压

频率 40 Hz);(2) 打开转速闭环, 仅改变电流闭环电流给定值, 研究分数次谐波的情况。结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 不同回路电流下谐波次数和含量及总的谐波畸变率

| 电流 /A | 特征谐波次数及含量 /% | | | | THD /% |
|-------|--------------|------|------|------|--------|
| | H5 | H7 | H11 | H13 | |
| 1 500 | 24.56 | 8.20 | 7.74 | 4.95 | 27.49 |
| 2 000 | 22.85 | 9.33 | 7.09 | 4.87 | 26.15 |
| 2 500 | 21.67 | 9.65 | 6.43 | 4.32 | 24.96 |

由表 4 可知, 随着回路电流的增大, 总的谐波畸变率随之减小。由式(6)可知, 当电源电压不变, 换相电抗不变时, 随着直流电流 I_d 的增大, 控制角变小(范围 $0\sim 90^\circ$), 换相重叠角 r 增大。总的谐波畸变率降低。

表 5 不同回路电流下分数次谐波次数及含量

| 电流 /A | 分数次谐波次数及含量 | | | | | |
|-------|------------|------|-----|------|------|------|
| | Ih1 | % | Ih2 | % | Ih3 | % |
| 1 500 | 3.8 | 4.40 | 5.8 | 3.94 | 0.18 | 1.29 |
| 2 000 | 3.8 | 4.26 | 5.8 | 3.44 | 0.16 | 1.07 |
| 2 500 | 3.8 | 3.27 | 5.8 | 2.47 | 0.14 | 1.31 |

由表 5 可知, 随着电源电压的升高, 分数次谐波次数几乎不变, 分数次谐波含量大致呈下降趋势。分数次谐波含量下降也源于换相重叠角的增大。分数次谐波次数不变, 说明回路电流改变对分数次谐波次数几乎没有影响。

3.3 网桥控制角的影响

为了研究网桥控制角对分数次谐波的影响, 设计如下工况:(1) 电机转速保持基本不变(端电压频率 40 Hz);(2) 改变网桥控制角, 研究分数次谐波情况。

SFC 控制系统在双闭环控制下运行, 达到 40 Hz 时网桥控制角度约为 43° 。打开闭环控制, 机桥输出频率在 40 Hz 时, 控制角分别整定为: 40° , 43° 和 46° , 对应的直流电流平均值分别为 2 350 A, 2 050 A, 1 550 A。结果如表 6 和表 7 所示。

由表 6 可知, 随着控制角的增大, 总的谐波畸变率随之增大。由式(6)可知, 当电源电压不变, 换相电抗不变, 控制角范围在 $(0\sim 90^\circ)$ 时, 随着控制角的增大, 直流电流的减小, 换相重叠角 r 减小。总的谐波畸变率升高。

由表 7 可知, 随着控制角的增大, 分数次谐波次数几乎不变, 分数次谐波含量大致呈上升趋势。分数次谐波含量上升源于换相重叠角的减小。分数次谐波次数不变, 说明控制角的改变对分数次谐波次

表 6 不同网桥控制角下谐波次数和含量及总的谐波畸变率

| 控制角 / $^\circ$ | 特征谐波次数及含量 /% | | | | THD /% |
|----------------|--------------|------|------|------|--------|
| | H5 | H7 | H11 | H13 | |
| 40 | 22.04 | 9.59 | 6.66 | 4.48 | 25.35 |
| 43 | 22.45 | 9.59 | 6.92 | 4.98 | 25.87 |
| 46 | 24.51 | 8.20 | 7.79 | 4.89 | 27.44 |

表 7 不同网桥控制角下分数次谐波次数及含量

| 控制角 / $^\circ$ | 分数次谐波次数及含量 | | | | | |
|----------------|------------|------|-----|------|------|------|
| | Ih1 | % | Ih2 | % | Ih3 | % |
| 40 | 3.8 | 3.54 | 5.8 | 2.76 | 0.14 | 2.34 |
| 43 | 3.8 | 2.75 | 5.8 | 2.26 | 0.16 | 1.11 |
| 46 | 3.8 | 5.48 | 5.8 | 4.83 | 0.16 | 1.97 |

数几乎没有影响。

3.4 机桥输出频率的影响

为了研究机桥输出频率对分数次谐波的影响, 设计工况如下: 电机从较低转速一直升速到同步转速。结果如表 8 和表 9 所示。

表 8 不同机桥输出频率下谐波次数和含量及总的谐波畸变率

| 频率 /Hz | 特征谐波次数及含量 /% | | | | THD /% |
|--------|--------------|------|------|------|--------|
| | H5 | H7 | H11 | H13 | |
| 5 | 24.10 | 8.48 | 7.72 | 4.77 | 27.11 |
| 10 | 24.33 | 8.33 | 7.91 | 4.63 | 27.30 |
| 20 | 23.07 | 8.17 | 6.44 | 3.89 | 25.66 |
| 30 | 23.32 | 9.06 | 7.35 | 4.94 | 26.54 |
| 40 | 22.85 | 9.33 | 7.09 | 4.87 | 26.15 |
| 50 | 21.95 | 9.78 | 6.69 | 4.53 | 25.36 |

表 9 不同机桥输出频率下分数次谐波次数及含量

| 频率 /Hz | 分数次谐波次数及含量 | | | | | |
|--------|------------|------|-----|------|------|------|
| | Ih1 | % | Ih2 | % | Ih3 | % |
| 5 | 0.4 | 5.38 | 1.6 | 4.12 | 4.4 | 1.71 |
| 10 | 0.2 | 4.32 | 2.2 | 3.35 | - | - |
| 20 | 1.4 | 2.22 | 3.4 | 4.16 | 2.06 | 3.05 |
| 30 | 2.6 | 3.81 | 4.6 | 3.49 | - | - |
| 40 | 3.8 | 4.26 | 5.8 | 3.44 | - | - |
| 50 | - | - | - | - | - | - |

由表 8 可知, 随着电机转速的升高, 总的谐波畸变率也随之变化, 但 THD 的变化不是单调的递增或递减。各次特征谐波的含量也是时大时小。这是因为电机升速是转速、电流双闭环调节的结果, 在电机升速过程中, 控制角、回路电流一直在变化, 闭环调节不是单纯的增大控制角或减小控制角, 因此 THD 及各次特征谐波含量时大时小。但总的来说, 电机升速的过程中, 控制角会逐渐变小, 按照控制角对谐波含量的分析可知, 总的谐波畸变率应该呈下降趋势。这与上表中仿真结果非常吻合。这也验证了前面分

析的正确性。

由表 9 可知,随着机桥输出频率的增大,分数次谐波的含量时大时小。这与总的谐波畸变率时大时小是同样的原因。随着机桥输出频率的增大,分数次谐波次数有显著的变化。这说明分数次谐波次数与机桥输出频率有着极大的关联性。根据 SFC 系统仿真结果,验证简化式(4)、式(5)的可用性。

当机桥输出频率为 5 Hz 时,用式(4)计算。当机桥输出频率为 10~50 Hz 时,用式(5)进行计算。计算结果见表 10。

表 10 不同机桥输出频率下简化公式计算结果

| 输出频率/Hz | 适用公式 | 谐波频率/Hz | 谐波次数 | 谐波频率/Hz | 谐波次数 |
|---------|------|---------|------|---------|------|
| 5 | 式(4) | 20 | 0.4 | 80 | 1.6 |
| 10 | 式(5) | 10 | 0.2 | 110 | 2.2 |
| 20 | 式(5) | 70 | 1.4 | 170 | 3.4 |
| 30 | 式(5) | 130 | 2.6 | 230 | 4.6 |
| 40 | 式(5) | 190 | 3.8 | 290 | 5.8 |
| 50 | 式(5) | 250 | 5 | 350 | 7 |

由表 10 可知,简化公式计算结果与 MATLAB 仿真结果非常吻合,这验证了简化公式的可用性。对实际工程应用来说,简化公式大大降低了计算的复杂度,同时能满足工程应用的实际需要。

值得注意的是,当机桥输出频率达到 50 Hz 时,网桥电流中没有分数次谐波,都是特征谐波。

4 结束语

SFC 系统在起动过程中,向电力系统注入了谐波电流,有特征谐波也有分数次谐波。不论是整数次谐波还是分数次谐波,换相重叠角对其含量都有显著的影响。一般来说,换相重叠角越小,谐波含量越大。因此,在 SFC 系统设计时,要综合考虑电源电压、回路电流、变压器漏感、直流回路电感等参数,并

兼顾 SFC 系统功率因素,控制换相重叠角在合理范围内,这对减小谐波污染,改善电能质量能起到一定的作用。

分数次谐波的次数与机桥输出频率有确定的关系。考虑到工程应用的可行性及方便性,通过类比的方法,推导简化的分数次谐波关系式,并通过仿真验证简化公式的可用性。该简化公式不仅对 SFC 工程实际的谐波预测、谐波分析,有很好的应用价值,而且对理解电流型变流器的谐波产生机理、谐波预测、谐波分析,均有较好的实用价值。

参考文献:

- [1] 宿清华,吴国忠,杨成林,等.抽水蓄能电站变频起动装置的谐波抑制探讨[J].浙江大学学报(工学版),2002,36(6):707.
- [2] 陈世青,赵新尚,李福祥.防止并联电容器运行中产生谐波放大[J].高电压技术,2004,30(12):19-22.
- [3] 张大海,徐文远.间谐波波形相序特性的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(12):29-34.
- [4] 郝江涛,刘念,幸晋渝,等.电力系统间谐波分析[J].电力自动化设备,2004,24(12):36-39.
- [5] GUNTHER E W. Interharmonics in Power Systems [C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vancouver, Canada, 2001.

作者简介:

- 石祥建(1980),男,江苏徐州人,工程师,从事电力电子在电力系统中的应用研究、工业过程自动控制研究工作;
- 司红建(1979),男,江苏南通人,工程师,从事设备技术管理工作;
- 吴小放(1978),男,陕西西安人,工程师,从事设备检修管理工作;
- 闫伟(1981),男,陕西咸阳人,工程师,从事电力电子在电力系统中的应用研究、发电机励磁系统研究工作;
- 牟伟(1981),男,四川成都人,工程师,从事发电机励磁系统研究、电力电子在电力系统中的应用研究工作;
- 施一峰(1979),男,江苏启东人,工程师,从事发电机励磁系统研究、电力电子在电力系统中的应用研究工作。

The Analysis on System Fractional Harmonic of Static Frequency Converter

SHI Xiang-jian¹, SI Hong-jian², WU Xiao-fang², YAN Wei¹, MOU Wei¹, SHI Yi-feng¹

(1. Nanjing NARI-Relays Electric Power Co.Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Jiangsu Shahe Pumped-storage Power Generation Co.Ltd., Liyang 213333, China)

Abstract: The effects that SFC system operating parameters have on fractional harmonic are studied by building Matrix Laboratory (MATLAB) closed-loop simulation model of static frequency converter (SFC). Analysis show that total harmonic distortion (THD) decreases as loop current increases, and increases as supply voltage increases. Fractional harmonic content has the similar law of changes, of which the reason is the change of commutation overlap angle. The times of fractional harmonic are closely related to output frequency of machine bridge. The simplified relation between fractional harmonic and machine bridge output frequency is derived by the method of analogy, and its availability is verified by simulations.

Key words: fractional harmonic; static frequency converter; MATLAB simulation; operating parameters