

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221378

适用于弱电网中大功率整流器次同步振荡抑制的新型控制策略研究

彭国敬, 孙祖勇, 朱 丹, 雷 磊

(南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 在弱电网中, 由于电网的阻抗特性较大, 线路中阻抗参数改变了整流器控制的关键参数, 影响了整流器的整体性能, 可能会导致整流器输出不稳定, 使输出呈现次同步振荡特性。为此, 在不增加硬件补偿系统的基础上, 提出了一种能够有效抑制次同步振荡的控制策略, 该抑制策略从数学模型角度出发, 通过低频滤波器提取出次同步振荡交流电流分量, 进行 d/q 变换后, 将该次同步振荡的 d/q 电流分量进行 PI 闭环控制, 次同步振荡分量的 PI 调节器输出值进行解耦补偿后乘以补偿系数得到电压的 d/q 补偿分量, 对原电流内环的输出进行补偿。仿真和试验结果表明, 该抑制策略有效、可行, 能够有效抑制次同步分量。

关键词: 弱电网; 次同步振荡; 低频提取; 抑制控制策略

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0207-04

1 引言

随着电力系统中大规模电力电子设备不断接入, 大量的感性器件亦随之接入电网, 电网中的阻抗特性亦随之发生变化, 特别是在弱电网中可能会出现电力系统的次同步振荡, 该振荡会直接威胁到电力系统的稳定性^[1,2]。随着新能源特别是风电的大规模并网, 该问题日益突出, 会导致风电系统的轴系机械系统振荡, 严重会导致风电大规模脱网及损坏^[3,4]。随着电网电抗相对逐渐增大, 电网越来越体现弱电网特性。电网阻抗的增加改变了控制拓扑中的关键参数, 影响了控制性能, 可能导致系统不稳定。在弱电网条件下, 影响系统并网稳定性的因素较多, 电网的阻抗参数越大, 则弱电网用电设备控制对系统并网点电压的影响亦越大, 入网电流的特性除了直接受闭环控制参数影响, 还间接受到该入网电流在电网阻抗上的压降带来的影响, 同时受入网电流影响的并网点电压, 不仅影响电网电压前馈环节, 还将通过锁相环节影响电流闭环的反馈通道, 控制系统深度耦合, 复杂程度大大提高。次同步振荡抑制可通过在电力系统中增加次同步阻尼控制进行抑制。目前已有研究中对于电力系统中的次同步振

荡均增加了相位补偿环节, 但对于风电系统中的次同步振荡的相位补偿环节中的参数设计较为困难。为避免相位补偿参数选定困难导致次同步振荡抑制效果不明显, 本文提出了一种新的抑制策略, 即在不增加额外的补偿装置的前提下, 通过改变整流器的控制策略, 在弱电网下能够避免次同步振荡的出现。

2 系统模型建立及方案设计

2.1 系统模型建立

整流器的滤波回路一般采用 LC 滤波器, 当单台整流器接入弱电网时, 弱电网中的强电感与整流器的滤波回路可等效构成 LCL 滤波器, 即等效视为带有 LCL 滤波回路的整流器接入电网中, 等效滤波回路见图 1。

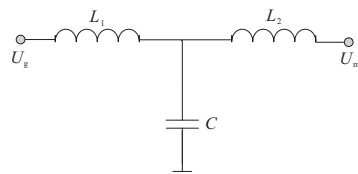


图 1 滤波回路等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of filter circuit

不考虑线路中的电阻参数, 整流器侧的输出电压至网侧电流的函数传递结构图见图 2。

收稿日期: 2022-07-06, 修回日期: 2022-08-04

作者简介: 彭国敬(1987-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为电力电子技术在新能源中应用, E-mail: pengguojing@

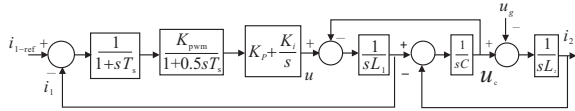


图 2 传递函数结构框图

Fig. 2 Transfer function structure block diagram

由图 2 可得整流器的电流 i_1 的系统开环传递函数 $G(s)$ 为:

$$G(s) = (L_1 C L_2 s^3 + (L_1 + L_2) s)^{-1} \quad (1)$$

式中, L_1 为电网等效电感; L_2 为整流器并网电感; C 为滤波电容。

当 $L_1 = 6 \times 10^{-5} \text{H}$ 、 $L_2 = 5 \times 10^{-4} \text{H}$ 、 $C = 420 \times 10^{-6} \text{F}$ 时绘制根轨迹图, 见图 3。

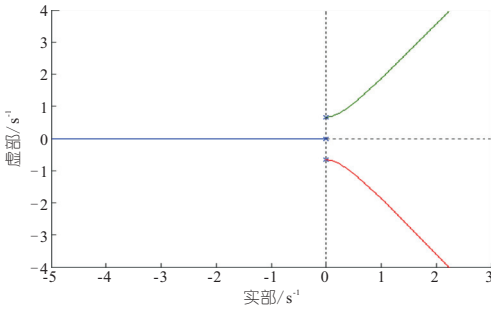


图 3 根轨迹图

Fig. 3 Root locus

通过图 3, 根据特征根分布, 此时系统处于临界状态, 再叠加整流器的控制参数及系统其他阻尼特性, 交流侧电感 L_1 的参数不合适时很容易造成系统不稳定。

2.2 整流器控制模型

SVPWM 整流器一般作为恒压直流源, 采用直流侧电压外环、交流侧电流内环的双闭环结构控制策略, 电压外环控制直流侧的输出电压, 电压外环的输出作为电流内环的给定, 电流内环控制交流侧电流。在控制中采用 d/q 坐标系下的解耦控制, 输出的有功和无功表达式为:

$$\begin{cases} P_{\text{grid}} = 3(u_{\text{grid-d}} i_{\text{grid-d}} + u_{\text{grid-q}} i_{\text{grid-q}}) / 2 \\ Q_{\text{grid}} = 3(u_{\text{grid-q}} i_{\text{grid-d}} - u_{\text{grid-d}} i_{\text{grid-q}}) / 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_{grid} 、 Q_{grid} 分别为有功功率、无功功率; $u_{\text{grid-d}}$ 、 $u_{\text{grid-q}}$ 分别为网侧 d 、 q 轴电压; $i_{\text{grid-d}}$ 、 $i_{\text{grid-q}}$ 分别为网侧 d 、 q 轴电流。

由于采用电网电压定向的矢量控制技术, 将电压定在 d 轴上, 即 $u_{\text{grid-d}} = u_{\text{gd}}$ 、 $u_{\text{grid-q}} = 0$ 。将这两个条件代入式(2)可得:

$$\begin{cases} P_{\text{grid}} = 3u_{\text{grid-d}} i_{\text{grid-d}} / 2 \\ Q_{\text{grid}} = -3u_{\text{grid-d}} i_{\text{grid-q}} / 2 \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} u_{\text{grid-d}} = r_{\text{grid}} i_{\text{sd}} + L_{\text{grid}} p i_{\text{sd}} - \omega L_{\text{grid}} i_{\text{sq}} + u_{\text{gsd}} \\ u_{\text{grid-q}} = r_{\text{grid}} i_{\text{gsq}} + L_{\text{grid}} p i_{\text{sd}} + \omega L_{\text{grid}} i_{\text{sd}} + u_{\text{gsq}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, u_{gsd} 、 u_{gsq} 分别为网侧变换器电压的 d 、 q 分

量; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为网侧变换器的 d 、 q 分量; ω 为外部电网电压的电角速度; p 为微分算子。

则式(4)可变为:

$$\begin{pmatrix} -L_{\text{grid}} p - r_{\text{grid}} & \omega l \\ -\omega l & -L_{\text{grid}} p - r_{\text{grid}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\text{sd}} \\ i_{\text{gsq}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_{\text{grid-d}} \\ u_{\text{grid-q}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{\text{gsd}} \\ u_{\text{gsq}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, L_{grid} 为并网电感; r_{grid} 为并网电感等效电阻; ω 为工频角速度; l 为耦合电感。

通过式(5)可看出对网侧电压控制需增加一个补偿量控制来实现解耦控制, 其中补偿量为:

$$\begin{cases} u'_{\text{gq}} = \omega L_{\text{grid}} i_{\text{sq}} \\ u'_{\text{gd}} = -\omega L_{\text{grid}} i_{\text{sd}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, u'_{gq} 、 u'_{gd} 分别为待补偿的电压 q 、 d 轴分量。

2.3 次同步振荡补偿控制策略设计

当电网系统出现次同步振荡时, 电网中含有次同步振荡的频率, 则式(4)可转换为:

$$\begin{pmatrix} u_{\text{gsd}}' + u_{\text{gsd}}^* \\ u_{\text{gsq}}' + u_{\text{gsq}}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_{\text{grid}} p - r_{\text{grid}} & \omega L_{\text{grid}} \\ -\omega L_{\text{grid}} & -L_{\text{grid}} p - r_{\text{grid}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{\text{sd}}' + i_{\text{sd}}^* \\ i_{\text{gsq}}' + i_{\text{gsq}}^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_{\text{grid-d}} \\ u_{\text{grid-q}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, u_{gsd}' 、 u_{gsq}' 、 i_{sd}' 、 i_{gsq}' 为 d/q 变换后的直流分量; u_{gsd}^* 、 u_{gsq}^* 、 i_{sd}^* 、 i_{gsq}^* 为 d/q 变换后的交流分量。该交流分量包含有除工频外的次同步频率分量, 其表达式为:

$$\begin{pmatrix} u_{\text{gsd}}^* \\ u_{\text{gsq}}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_{\text{grid}} p - r_{\text{grid}} & \omega L_{\text{grid}} \\ -\omega L_{\text{grid}} & -L_{\text{grid}} p - r_{\text{grid}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\text{sd}}^* \\ i_{\text{gsq}}^* \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\text{其中 } i_d^* = I_d^n \sum_n \cos[(\omega_n - \omega_0)t]$$

$$i_q^* = I_q^n \sum_n \sin[(\omega_n - \omega_0)t]$$

式中, ω_n 、 ω_0 分别为次同步的三相交流次同步分量角速度和工频分量的角速度。

通过式(8)可看出, 抑制控制方式与交流内环的控制方式相同, 经过 PI 控制环对该变量进行调节后对输出的电压进行补偿, K 为补偿系数, 控制策略见图 4。

3 模型搭建与仿真分析

为验证本文抑制策略的可行性及有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型, 电网线路电抗 $L_1 = 200 \mu\text{H}$, 整流器滤波电抗 $L_2 = 500 \mu\text{H}$, 整流器滤波电容 $C = 420 \mu\text{F}$, 开关频率 $2k$, 整流

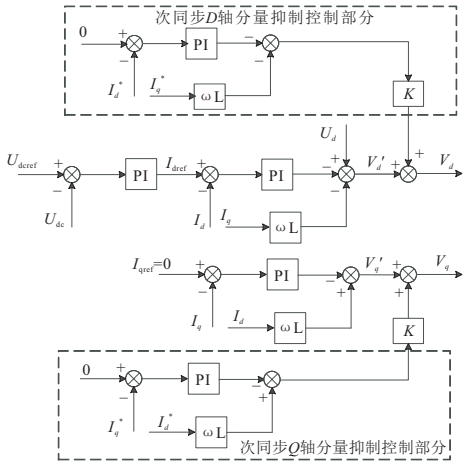


图 4 含有抑制策略的整流器控制策略

Fig. 4 Rectifier control strategy with suppression strategy
 器输出电压目标值 1 500 V, 补偿系数 $k = 0.35$, 整流器直流侧负载电阻为 5Ω 。Matlab 中的仿真模型见图 5。

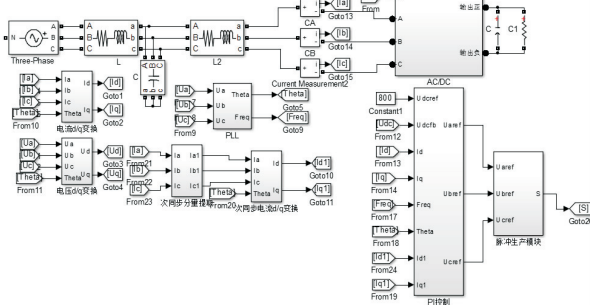


图 5 仿真模型

Fig. 5 Simulation model

刚开始时, 整流器采用不投入抑制策略的控制方法, 仿真时间为 1.8 s 时, 投入抑制控制策略, 仿真波形见图 6。由图 6 可看出, 抑制策略投入前, 整流器直流侧输出电压波动较大, 交流侧电压、电流存在次同步振荡, 投入抑制策略后, 经过很短的动态调整后, 直流侧输出电压稳定在 1 500 V, 交流侧电压、电流次同步振荡消失。

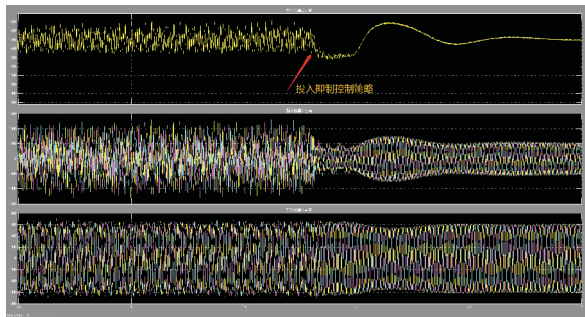


图 6 整流器输出直流电压及交流电流

Fig. 6 Rectifier output DC voltage and AC current

图 7、8 分别为抑制策略投入前后交流电压、电流波形及 THD。由图 7、8 可看出, 未投入抑制策略前, 整流器侧交流电压、电流次同步分量含量

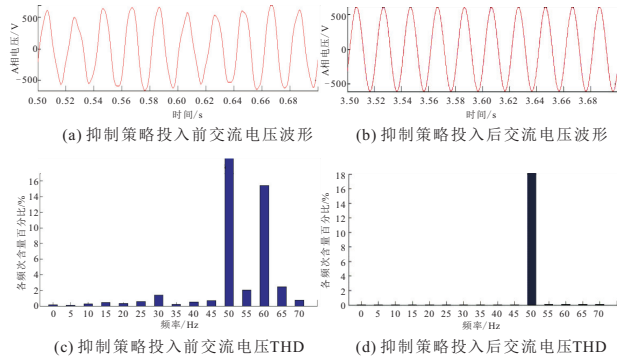


图 7 抑制策略投入前后交流电压波形及 THD

Fig. 7 AC voltage waveform before and after suppression strategy input and THD

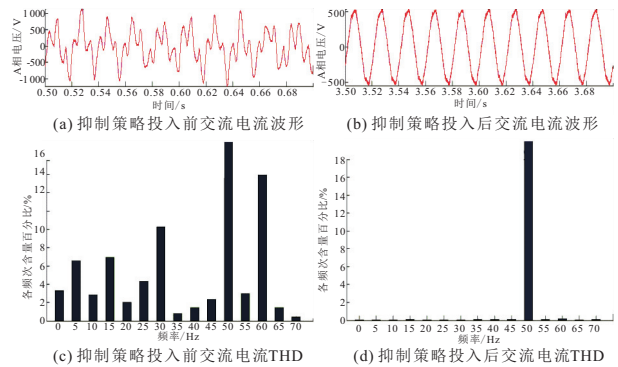


图 8 抑制策略投入前后交流电流波形及 THD

Fig. 8 AC current waveform before and after suppression strategy input and THD

比例较大, 其中电压的次同步分量占比最高可达 2%, 其中 60 Hz 分量高达 13.9%, 整体 THD 高达 27.63%, 电流中的次同步分量占比最高可达 10%, 其中 60 Hz 分量高达 12%, 整体 THD 高达 76.35%; 投入抑制策略后, 电压、电流的次同步分量得到有效抑制, 电压 THD 下降到 0.72%, 工频以外的分量达到了有效抑制, 电流 THD 下降到 5%, 同样, 电流工频以外的分量也得到了有效地抑制。

4 试验平台搭建与验证测试

为进一步验证本文抑制策略的有效性及其可行性, 搭建试验平台, 整机功率为 120 kW, 接入电网电压 380 V, 电网侧电感为 $300 \mu\text{H}$, 整流器侧电感为 $280 \mu\text{H}$, 滤波电容为 $55.7 \mu\text{F}$, 采样三角形连接。图 9 为投入次同步抑制策略前后对比。由图 9 可看出, 未投入次同步抑制策略时, 交流侧电压、电流均出现了次同步振荡, 在次同步振荡幅值达到最大值时, 投入次同步振荡抑制策略, 交流侧电压、电流的次同步分量得到有效抑制, 电压、电流迅速进入到平稳状态。

综上所述, 本文抑制策略可行、有效, 能够有

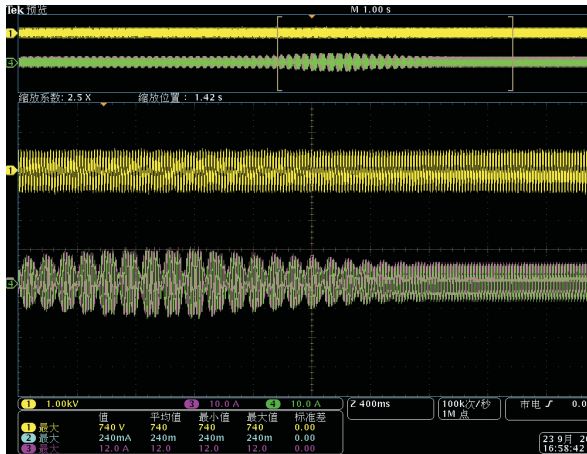


图 9 投入次同步抑制策略前后对比 (Ch1-电压, Ch2-电流)
 Fig.9 Comparison before and after putting into subsynchronous suppression strategy (Ch1-voltage, Ch2-current)

效抑制次同步分量。

5 结论

Research on New Control Strategy for Sub-synchronous Oscillation Suppression of High Power Rectifier in Weak Current Network

PENG Guo-jing, SUN Zu-yong, ZHU Dan, LEI Lei
 (NARI Group Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In the weak current network, due to the large impedance characteristics of the power grid, the impedance parameters in the line change the key parameters of the rectifier control, affecting the overall performance of the rectifier, which may lead to the unstable output of the rectifier, and the output presents the characteristics of sub-synchronous oscillation. On the basis of not increasing the hardware compensation system, this paper proposes a control strategy that can effectively suppress the sub-synchronous oscillation. Based on the mathematical model, the AC current component of the sub-synchronous oscillation is extracted through the low-frequency filter. After d/q transformation, the d/q current component of the sub-synchronous oscillation is PI closed-loop controlled. The output value of the PI regulator of the sub-synchronous oscillation component is decoupled and compensated, and then multiplied by the compensation coefficient to obtain the d/q compensation component of the voltage. The output of the original current inner loop is compensated. A simulation and test results show that the control strategy is effective and feasible, which can suppress sub-synchronous components.

Key words: weak power grid; sub-synchronous oscillation; low frequency extraction; suppression control strategy

 (上接第 202 页)

Oil Leakage Image Recognition of Peak Regulation Power Equipment Based on Logical Semantic Discrimination

SONG Qian¹, QI Wei-wen², FANG Bing², FAN Qiang², ZHENG Hui-juan³, HU Fei³

(1. Water and Innovation Department, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

2. Shaoxing Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Shaoxing 310000, China;

3. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: To address the challenges in oil leakage image recognition of peak regulation power equipment, a new method is proposed by introducing logical rule discrimination strategy into the task of image recognition. The technology of histogram equalization is adopted to improve original image. Then Mask RCNN network is introduced to obtain the preliminary location and contour information of storage device, ground and suspected oil area. Based on the above information, positional relationships between objects are judged, and logical expressions are adopted to determine the oil leakage area. Example analysis is conducted based on filed images of peak regulation power equipment. The results indicate that the proposed framework solves the problems in oil leakage area recognition, largely boosting model performance.

Key words: peak regulation power equipment; oil leakage image recognition; positional relationship recognition; logical semantic discrimination

a. 本文提出一种能够有效抑制次同步振荡的控制策略,即在原有整流器恒压解耦控制策略的基础上,提取电流环 d/q 轴振荡的交流分量,经过 PI 控制器后,通过补偿系数 K 的修正,对原有的电流内环的输出进行补偿修正。

b. 仿真和试验结果表明,本文抑制策略有效、可行,能够有效抑制次同步分量。

参考文献:

[1] 黄云虹,高学军,余小莉,等. 弱电网条件下 STATCOM 对风电场电压稳定性的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8):204-208, 213.
 [2] 曹娜,管雪帅,于群,等. 基于正序阻抗的直驱风电机组次/超同步振荡影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(2):160-164.
 [3] 钟胜. 超高压输电线路加装串补装置有关的系统问题以及解决方案[J]. 电网技术, 2004, 28(6):26-30.
 [4] 王亮,谢小荣,姜齐荣,等. 大规模双馈风电场次同步振荡的分析与抑制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22):26-31.