

电力与传动控制

双星形联结发电机供电的 24 脉波变流器及其控制

郑 雪, 李维斌, 陈俊宏, 王雅丽

(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610225)

摘 要: 稳定的等离子体放电是开展高质量物理实验的主要基础, 在等离子体垂直位移发生偏移时, 需对其进行反馈控制以修正偏移量。为了对等离子体垂直位移进行有源反馈控制, 文章设计了一种 24 脉波变流器, 其需要满足特殊的供电条件, 即双星形联结发电机供电。优化设计的 24 脉波变流器, 其通过正、负两组变流器协同工作, 实现大电流下的四象限运行; 通过变压器和变流器的有序组合, 使得发电机两个星形供电的负荷均衡; 采用逻辑带环流的控制方式, 使得电流过零连续平滑; 并充分利用双星形联结发电机阻抗较大的特点来抑制环流, 且省去平衡电抗器, 降低了电源成本。仿真结果表明, 这种 24 脉波变流器在双星形联结发电机供电的特殊供电条件下, 能够满足等离子体垂直不稳定控制的基本要求。

关键词: 24 脉波变流器; 四象限变流器; 逻辑带环流模式; 托卡马克装置

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)01-0052-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.01.300

24-pulse Converter Fed by Double Y Motor-generator and Its Control

ZHENG Xue, LI Weibin, CHEN Junhong, WANG Yali

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract: Stable discharge of plasma is the main foundation for high quality physics experiment. When the vertical displacement of plasma is offset, feedback control is required to correct the offset. For the sake of controlling the vertical displacement of plasma by active feedback, a 24-pulse converter is proposed, which has to conform to the special power condition, i.e., the double Y motor-generator. The optimized 24-pulse converter has 2-group converters, positive group and negative group, working together so as to realize 4-quadrant operation under large current. The loads of the double Y motor-generator are balanced by the way of the combination between the transformers and the converters. The control with logical circulating current is used, so that the output current is continuous and smooth in the zero-crossing point. Benefit from the large impedance of motor-generator, balanced reactor could be omitted which could make cost reduction. It is enable for the 24-pulse converter to meet the basic requirements of plasma vertical instability control under the unique double Y motor-generator power condition.

Keywords: 24-pulse converter; 4-quadrant converter; logical circulation model; Tokmak device

0 引言

HL-2M 装置是我国新一代磁约束核聚变装置,

也是我国目前规模最大、参数要求最高的先进托卡马克装置, 主要用于等离子体物理实验及其聚变工程技术研究。稳定的等离子体放电是开展高质量物理实验的主要基础。等离子体的约束、加热和控制分别通过环向场 (TF) 线圈、中心螺线管 (CS) 线圈和极向场 (PF) 线圈等产生的磁场作用而表现的, 其中 D 形分布的 16 组 PF 线圈主要控制等离子体的截面位形和位移, PF7 线圈需要兼顾与等离子体位形

收稿日期: 2020-10-28

作者简介: 郑雪 (1991—), 女, 博士, 主要研究方向为电力电子技术。

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项资助项目 (2018YFE0301103)

和垂直不稳定性的控制。在拉长三角形变偏滤器位形（实现核聚变的优化位形）下，存在大而快的等离子体沿着垂直方向（向上或向下）快速离散的一种边缘局域模（edge localized mode, ELM）现象^[1]，需要进行有源反馈控制。国内国际上的许多装置主要采用以 IGBT 全桥逆变或者晶闸管全桥整流为基础的电源来控制等离子体垂直不稳定性的主要手段，但均面临着高频率与小纹波性能无法兼顾的问题。本文设计了一种 24 脉波变流器，在兼顾电压纹波小的同时一定程度上提升了输出频率。其由双星形联结绕组发电机（简称“双 Y 发电机”）供电，并通过变压器一次侧进行移相，不仅满足了双 Y 发电机的特殊性要求，而且简化了电路，节约了成本。值得研究的是，如果 PF7 线圈电源的电流正负分布严重不对称，则需要电源进行相应的快速响应，及时输出所需要的电流。

1 双 Y 发电机供电的 24 脉波变流器结构

本文设计的变流器采用两组 24 脉波变流器并以正、负两组带环流的方式联合运行，其拓扑结构如图 1 所示，负载为阻感负载。

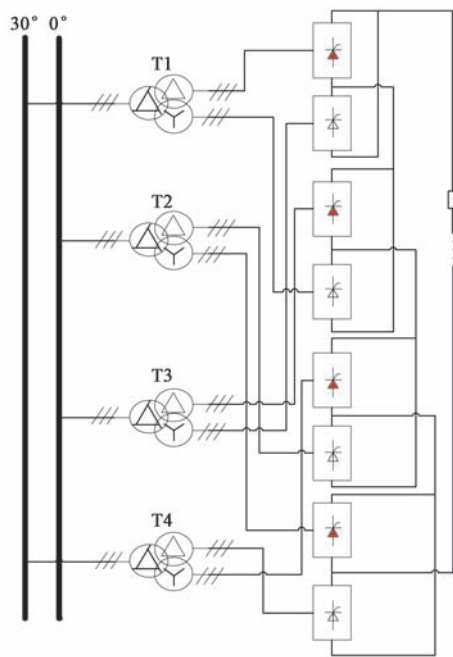


图 1 24 脉波变流器拓扑结构
Fig. 1 Topology of the 24-pulse converter

由于发电机为两个星形联结绕组结构，具有 30° 的相位差，所以在变压器设计和变压器与整流桥配对上有一定的设计难度，需要充分利用发电机双星形联结绕组的特殊性。

1.1 双 Y 发电机

本设计所采用的双 Y 发电机容量为 300 MVA，频率范围为 70~110 Hz，输出形式为双 Y 绕组互错 30°^[2]，工作方式为脉冲供电。发电机组的主要工作原理如下：以相对较小功率在较长的时间内从电网吸收能量并将整个机组轴系逐渐地加速到额定转速，把电能转换成机械能储存在机组轴系中；当需向负载供电时，发电机以数十倍的功率放电，将储存在机组轴系中的机械能被转换成电能提供给负载。表 1 示出该双 Y 发电机的部分参数。

表 1 双 Y 发电机参数
Tab. 1 Parameters of the double Y motor-generator

额定容量 /MVA	额定电压 /kV	额定功率因数	工作频率 /Hz	额定电流 /A	额定转速 /(r·min ⁻¹)	相数
300	3	0.65	99.6/67	28 868	498/335	6

1.2 移相变压器

电力变压器高、低压绕组的线电压既可以同相位，也可以移相 30° 的倍数角度；而移相变压器可以进行任意角度的移相，所以在多脉波二极管和多脉波晶闸管整流电路中应用较多。在这些电路中，运用移相变压器不仅可以实现多脉波输出，同时也可以消除谐波。

对于三相移相变压器来说，可以采用一次侧为延边三角形联结的结构，也可以采用二次侧为延边三角形联结的结构^[3]。本文的移相变压器一次侧为延边三角形联结，二次侧分别为三角形和星形联结（图 1）。其中一次侧绕组由匝数为 N_1 和 N_2 的两部分线圈组成， N_2 线圈采用三角形联结方式，每一相分别与 N_1 线圈进行串联，构成延边三角形联结。二次侧绕组由匝数为 N_3 和 N_4 的两部分线圈组成， N_3 线圈为三角形联结， N_4 线圈为星形联结。

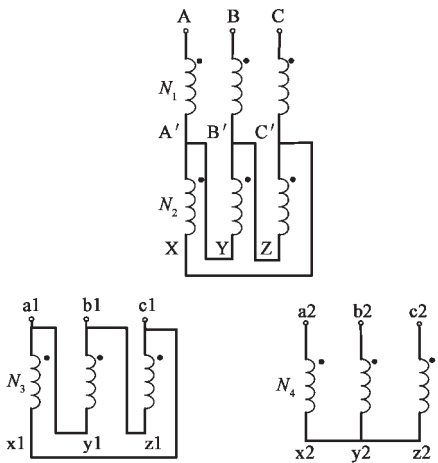


图 2 三相移相变压器绕组联结图
Fig. 2 Connection diagram of the windings of three-phase shift transformer

由图 2 所示的绕组连接方式可以画出其相量关系（图 3），其中 δ 为一次侧的移相角度， E 表示电动势。

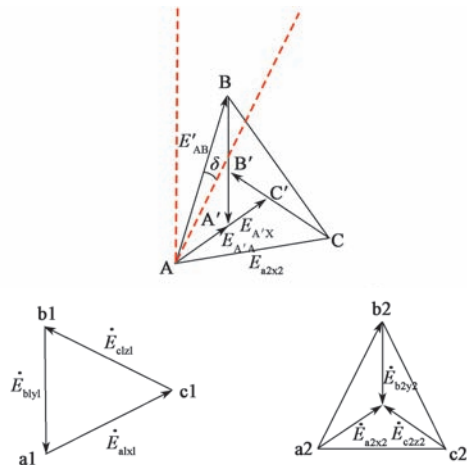


图 3 三相移相变压器相量图
Fig. 3 Vectogram of the three-phase shift transformer

绕组电动势与移相角的关系如式 (1) 所示：

$$\frac{E_{BY}}{\sin(30^\circ + \delta)} = \frac{E_{AA'}}{\sin(30^\circ - \delta)} = \frac{E_{AB}}{\sin 120^\circ} \tag{1}$$

由于 $E_{BY} = E_{BB'} + E_{B'Y}$ ，则有

$$E_{BB'} + E_{B'Y} = E_{AA'} + E_{A'X} \tag{2}$$

而电动势与匝数成正比：

$$\frac{E_{AA'}}{E_{AA'} + E_{A'X}} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \tag{3}$$

将式 (2) 和式 (3) 代入式 (1)，则有

$$\frac{N_1}{N_1 + N_2} = \frac{\sin(30^\circ - \delta)}{\sin(30^\circ + \delta)} \tag{4}$$

$$\frac{N_1 + N_2}{N_3} = \frac{2 \sin(30^\circ + \delta)}{\sqrt{3}} \times \frac{E_{AB}}{E_{a1b1}} \tag{5}$$

其中， $E_{a1b1} = E_{AB} \circ$

同理可得

$$\frac{N_1 + N_2}{N_4} = 2 \sin(30^\circ + \delta) \times \frac{E_{AB}}{E_{a2b2}} \tag{6}$$

其中， $E_{a2b2} = \frac{1}{\sqrt{3}} E_{a2b2} \circ$

所以，当移相角和变比已知时，可以得出匝数的大小。

图 4 示出移相变压器的相量图。图 4 (a) 为一次侧移相 +7.5°、二次侧为三角形联结和星形联结的移相变压器相量图；图 4 (b) 为一次侧移相 -7.5°、二次侧为三角形联结和星形联结的移相变压器相量图。

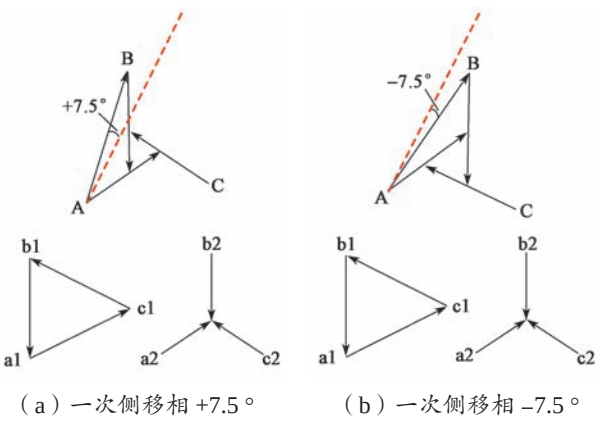


图 4 移相变压器相量图
Fig. 4 Vectogram of phase-shifting transformer

2 变流器工作模式

双 Y 发电机分别向 4 台三绕组变压器（T1~T4）供电^[4-5]。变压器均采用一次侧移相，二次侧绕组分别为三角形联结和星形联结，T1 和 T3 一次侧移相 +7.5°，T2 和 T4 一次侧移相 -7.5°；4 台三绕组变压器输出接 8 个全桥整流桥，分为正负两组变流器。T1 和 T4 接到 0° 移相的 Y 发电机，T2 和 T3 接到 30° 移相的 Y 发电机，由此可得出 4 台变压器二次侧相位情况（表 2）。

表 2 变压器相位表
Tab. 2 Phases of the transformers

变压器绕组连接 位置	变压器二次侧相位/(°)			
	T1	T2	T3	T4
发电机 Y 绕组	30	0	0	30
一次侧移相绕组	+7.5	-7.5	+7.5	-7.5
二次侧 Δ 绕组	37.5	-7.5	7.5	22.5
二次侧 Y 绕组	7.5	-37.5	-22.5	-7.5

如图 5 所示，实心的 4 个整流桥为正组变流器，串联之后可以得到 24 脉波的输出；另外 4 个整流桥为负组变流器，串联之后也可以得到 24 脉波输出。对同相位的两个变压器二次侧绕组所连接的全桥整流桥进行反向并联，反向并联的 2 个整流桥分别属于正组变流器和负组变流器。正组整流桥与变压器接线如图 5 (a) 所示，负组整流桥与变压器接线如图 5 (b) 所示。可以看出，无论是正组整流桥还是负组整流桥投入工作时，4 台变压器均被接入电路，变压器负荷均衡，同一个变压器的 2 个二次侧绕组分别连接正组整流桥和负组整流桥；4 台变压器只有 2 种连接组别，电路结构相对简单，且变压器成本可以得到控制。

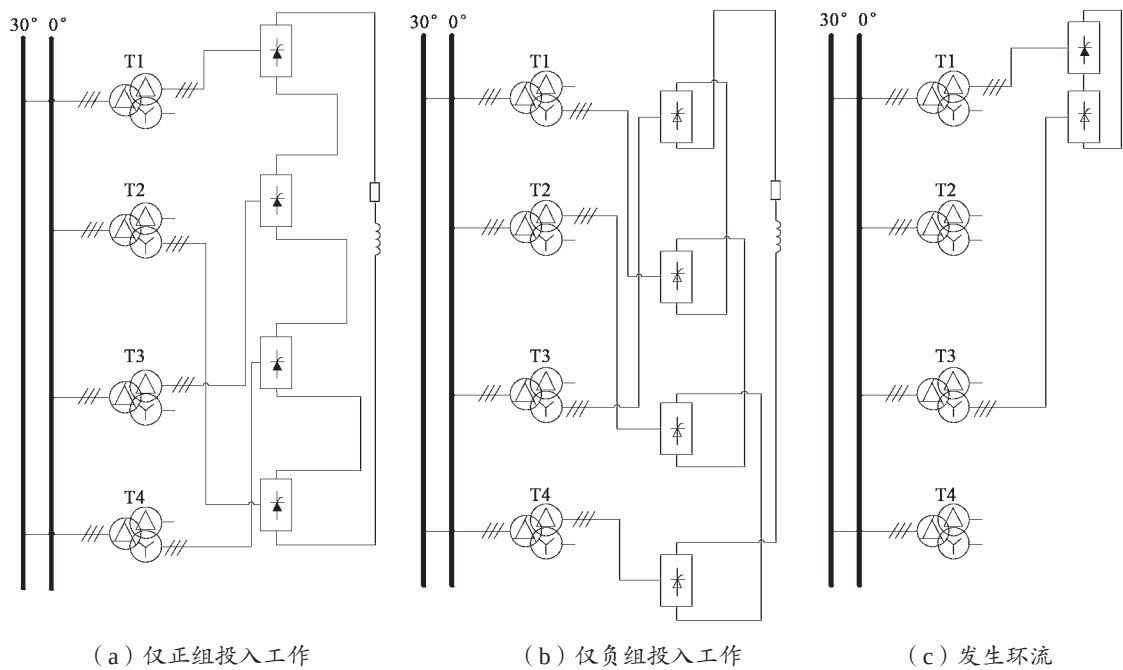


图 5 24 脉波变流器工作模式
Fig. 5 Working modes of the 24-pulse converter

当电流大于零时，仅正组变流器投入工作；当电流小于零时，仅负组变流器投入工作；当电流趋近于零时，设定一个电流过零窗口。为了使得电流可以平滑过零，正负组变流器在过零窗口同时投入工作，即带环流运行。鉴于双 Y 发电机的特殊性和变流器的控制方式，此种拓扑具有以下几个优点：

- (1) 变压器容量小且负荷均衡。
- (2) 不论哪种工况，发电机和网侧负荷都均衡。
- (3) 当某个整流桥发生故障而引起环流失控时，只影响与故障整流桥反向并联的整流桥，最大限度地保护了其他整流桥。
- (4) 当发生环流时，虽然环流会流过发电机的两个星形绕组，如图 5 (c) 所示，但由于双 Y 发电机具有较大的阻抗，因此可以有效地抑制环流，减小环流对回路的影响。
- (5) 变流器可以进行四象限运行，以满足更多的运行工况需求。
- (6) 变流器可以实现电流平滑过零，电流、电压连续可调。

3 控制策略

24 脉波变流器的作用是在等离子体的垂直位移发生偏移时，对其快速响应并及时修正偏移量。在实际运行过程中，等离子体的垂直位移是以电流的形式送入变流器控制系统并进行计算的，此电流可以按照

给定的波形进行变化。因此在变流器中加入负反馈模块并采用 PID 算法对输出电流进行实时监测，一旦输出电流偏离给定值，立刻对电流偏移量进行实时修正。

控制系统需要读取负载电流数据、控制参数等，具体步骤如下：读取负载电流数据，与给定值进行对比，并将结果送入 PID 模块进行计算，将所得到的晶闸管控制角信号送入晶闸管触发电路，最终得到与给定值相同的负载电流（图 6）。

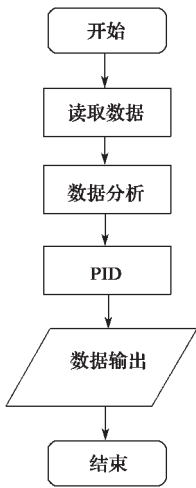


图 6 24 脉波变流器控制流程图
Fig. 6 Control flow chart of the 24-pulse converter

对仿真模型中 PID 参数进行选择：首先，为电路设计负反馈环节，将负载电流 i_d 作为输出采样值与给定值进行比较；其次，去除 PID 控制器模块中的积分项 (I) 和微分项 (D)，使控制器为纯比例 (P)

调节控制方式，由 0 逐渐加大比例增益 P ，直至系统出现振荡，或从此时的比例增益 P 逐渐减小，直至系统振荡消失，记录此时的比例增益 P ，即 $P=10$ 。在确定控制器的比例参数 P 后，先设定一个较大的积分时间常数 I （一般取比例系数的十分之一），将给定信号设置为常数直流输出（此处设为 10 kA），观察输出电流波动 Δi 情况（表 3）。可以看到，在 $P=10$ 的条件下， $I=0.1$ 和 $I=0.08$ 时，可以完全消除静差。最终参数选取 $P=10$ ， $I=0.1$ 。

表 3 不同积分时间常数时的电流波动情况
Tab. 3 Fluctuation of current under different integral coefficient

PID(I)	1	0.8	0.6	0.3	0.1	0.08	0.05
i_d/A	10 030	10 020	10 010	10 010	10 000	10 000	9 998
$\Delta i/A$	30	20	10	10	0	0	-2

当电流为正时，控制系统解封正组晶闸管、封锁负组晶闸管，并将计算得到的晶闸管控制角信号送入正组晶闸管触发电路；当电流为负时，控制系统解封负组晶闸管、封锁正组晶闸管，并将计算得到的晶闸管控制角信号送入负组晶闸管触发电路。理想情况下，在电流过零时，正、负组变流器可以进行理想切换，使得电流可以平滑过零。实际应用时，由于信号延时、开关器件动作不一致等因素，会造成因正、负组变流器切换不理想而导致的电流断续情况的发生。为此，需要在控制过程中设置电流过零窗口期，即在 $-100\sim100$ A 电流范围内，当电流趋近于零时，同时解封正、负组晶闸管。此时电流将分成两部分：一部分流过负载，另一部分流过正、负组变流器，形成环流，此种方式被称为逻辑带环流模式。采用这种控制方式，在保证电流跟随性的同时，还能够使得电流平滑过零，从而保证变流器输出质量。

4 仿真验证

对图 7 所示的 24 脉波变流器拓扑进行 Matlab 仿真建模。采用电流反馈进行控制，设定一个给定电流，利用负反馈模块进行实时控制，以保证输出电流的跟随性；当输出电流发生偏移时，PID 算法将会对其进行修正。为了便于仿真与分析，假设所有开关器件均为理想器件，忽略变压器的漏感和电阻，则发电机为可被等效为理想电压源。采用电压源模块代替发电机，一共有 4 个电压源模块，模块频率为 100 Hz，输出电压为 3 000 V。其中，2 个同相位模块 (0°) 用于模拟发电机 Y 绕组 1；另两个同相位模块 (30°) 用

于模拟发电机 Y 绕组 2。

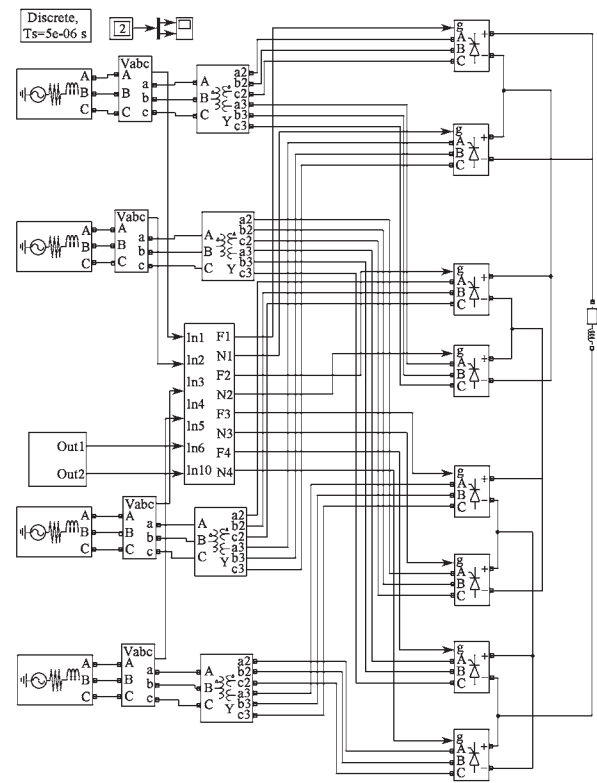


图 7 24 脉波变流器 Matlab 模型
Fig. 7 Simulation model of the 24-pulse converter

变压器为一次侧移相变压器，其与变流器的连接方式与图 1 的相同，负载参数被设置为 $R=7.5\text{ m}\Omega$ ， $L=7.3\text{ mH}$ 。图 8 所示为变流器触发电路^[6]，其中 α 为触发角信号，可以通过改变 α 来改变输出电压；block 为封锁/解封锁信号，0 表示解封锁，1 表示封锁。

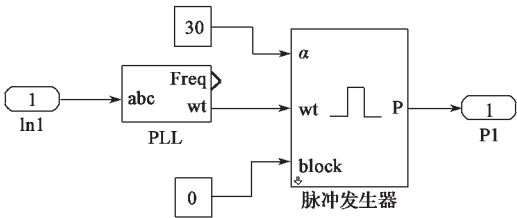


图 8 触发电路模块
Fig. 8 Trigger circuit

当电流大于零时，正组变流器工作；当电流小于零时，负组变流器工作；当电流即将过零时，采用逻辑带环流模式工作，正、负组变流器被同时开启。设置在电流过零时间窗口内发生环流，采用负反馈调节。设定一个给定电流作为负反馈的参考值，采用 PID 控制对输出电流进行采样，与给定电流进行比较，将输出电流偏离给定电流的偏移量送入 PID 模块，经过计算之后，得到变流器触发角 α ，将触发角送入触发电路模块。

图 9 (a) 为输出电流和给定电流的仿真波形，可以看出，输出电流波形和给定电流波形基本重合，电流具有很好的跟随性，纹波率仅为 1.1‰。图 9 (b) 为电流过零处的放大波形，可以看出，电流过零波形十分平滑。得益于 PID 控制算法，输出电流能够快速响应并且具有较好的跟随性。

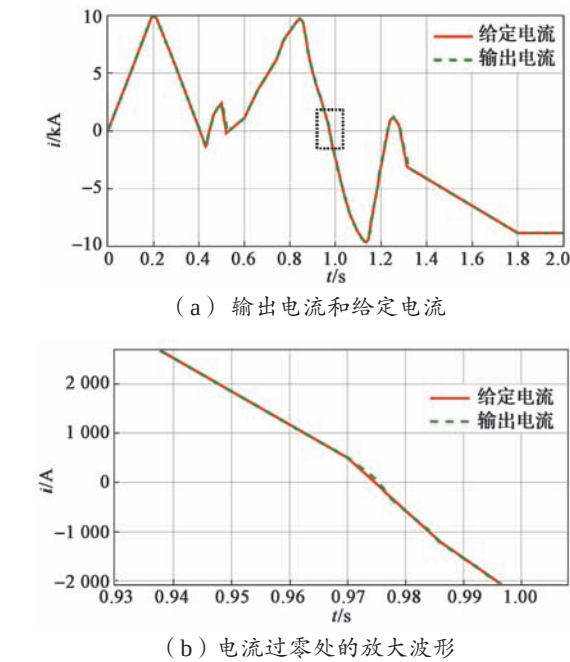


图 9 24 脉波变流器电流仿真波形
Fig. 9 Simulated current waveforms of the 24-pulse converter

由于发电机两个星形绕组之间的电抗非常大，可以起到平衡电抗器的作用。图 10 示出该变流器给定电流、输出电流、输出电压和过零处的环流仿真波形，可以看出环流最大值只有 2 kA 左右。如果在电路中

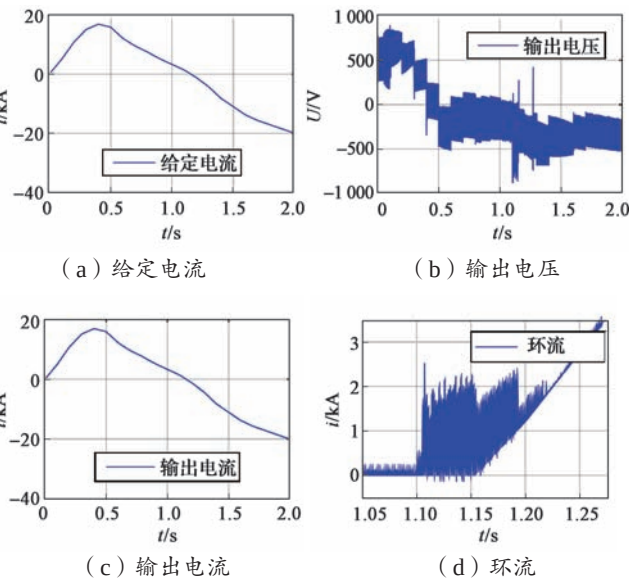


图 10 24 脉波变流器电流、电压、环流仿真波形
Fig. 10 Simulated waveforms of current, voltage and circulating current of the 24-pulse converter

添加平衡电抗器，其环流值将会更小。

5 结语

本文提出并设计了一种由双 Y 脉冲发电机供电的级联 24 脉波四象限变流器。采用这种拓扑具有以下优点：变压器与网侧负荷均衡，变压器负荷小；4 个变压器只有两种结构，节省成本；在发生环流失控时可以有效地保护整流桥；所采用的控制方式可实现大电流无环流运行，小电流逻辑有环流运行，电流具有很好的跟随性；采用正负组联合运行的方式可以实现四象限运行；发电机双 Y 之间较大的阻抗可以有效抑制环流，平衡电抗器可以很小。仿真结果验证了这种变流器结构应用于双 Y 发电机特殊供电条件的可行性，能够满足 HL-2M 装置对等离子体垂直不稳定性控制的需求，为下一步的工程实施提供了坚实的基础。

参考文献：

[1] 袁保山, 姜韶风, 陆志鸿. 托卡马克装置工程基础 [M]. 北京: 中国原子能出版社, 2011.

[2] PENG J F, WANG S J, LI H J, et al. Modeling and simulation of toroidal field power supply system of the HL-2A tokamak based on Matlab/Simulink[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2004, 24(4): 254-258.

[3] 李发海, 朱东起. 电机学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[4] YAO Y L, XUAN W M, LI H J, et al, Design and Development of the Power Supply for HL-2A Tokamak[J]. Fusion Engineering and Design, 2005(75-79): 163-167.

[5] XUAN W M, YAO L Y, CHEN Y H, et al. The Power Supply System for HL-2A Tokamak's Magnetic Field[J]. Plasma Science and Technology, 2007, 9(2): 211-215.

[6] 黄江波. 基于 Matlab 的三相桥式全控整流电路的仿真研究 [J]. 现代电子技术, 2010, 33(8): 202-204.

HUANG J B. Research and Simulation of Three-phase Full-bridge Control Rectifier Circuit Based on Matlab[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(8): 202-204.

[7] 刷海峰. 系统谐波分析中 24 脉波移相变压器的建模与仿真 [J]. 变压器, 2014, 51(3):30-33.

JU H F. Modeling and Simulation of 24 Pulse Phase-Shifting Transformer in System Harmonic Analysis[J]. Transformer, 2014, 51(3): 30-33.

[8] 温增银, 胡会骏. 六相双 Y30° 相带绕组同步电机短路的暂态过程 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 1974(4): 34-50, 121.

[9] 吕清松, 许宜申, 倪兆麟, 等. 基于半桥 LLC 谐振的 AC-DC 变换器研究与设计 [J]. 电气技术, 2019(10): 35-40.

LYU Q S, XU Y S, NI Z L, et al. Research and design half-bridge LLC resonant for AC-DC converter[J].Electrical Engineering, 2019(10): 35-40.