

1-8-2019

Open Circuit Fault Diagnosis Strategy for Switch of Three Level Inverter

Yanxia Shen

1. The Internet of Things Technology Application Engineering Research Center of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;;2. Institute of Electrical Automation, Jiangnan University,Wuxi 214122, China;

Beibei Miao

1. The Internet of Things Technology Application Engineering Research Center of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;;2. Institute of Electrical Automation, Jiangnan University,Wuxi 214122, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Open Circuit Fault Diagnosis Strategy for Switch of Three Level Inverter

Abstract

Abstract: Fault diagnosis of switch is the premise of reliable operation of three-level-inverter under the fault of the switch. *Taking simple open circuit fault of the diode neutral point clamped (NPC) three level inverter as an example, the open circuit fault diagnosis method based on the combination of online and offline diagnoses is proposed. The fault phase is detected by the mean value of the bridge arm phase voltages. In the time domain, the fault switch tube is diagnosed by the maximum and minimum values of the load phase voltages. In the frequency domain, the amplitude of the fault signal is extracted by the fast Fourier transform (FFT), and the open circuit fault diagnosis of the NPC three-level-inverter is realized by using the BP neural network.* Simulation results show that this method can greatly reduce the workload and improve the accuracy of fault diagnosis.

Keywords

NPC three-level-inverter, open circuit faults of switches, bridge arm phase voltages mean value, load phase voltages maximum and minimum values, FFT, BP neural network, fault diagnosis

Recommended Citation

Shen Yanxia, Miao Beibei. Open Circuit Fault Diagnosis Strategy for Switch of Three Level Inverter[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3058-3065.

三电平逆变器的开关管开路故障诊断策略

沈艳霞^{1,2}, 苗贝贝^{1,2}

(1. 江南大学物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

摘要: 开关管故障诊断是实现三电平逆变器在开关管故障下系统可靠运行的前提。针对二极管中点钳位型(NPC)三电平逆变器的简单开路故障, 提出了一种在线和离线诊断相结合的开路故障诊断方法。利用桥臂相电压的平均值进行故障相的检测, 针对时域内可以区分的故障, 利用负载相电压的最大值、最小值定位故障开关管, 针对时域内难以区分的故障, 经快速傅里叶变换(FFT)提取故障信号谐波的幅值, 利用BP神经网络实现简单开路故障诊断。仿真验证该诊断方法, 大大减少了对故障数据进行学习训练的工作量, 提高了故障诊断的准确性。

关键词: NPC 三电平逆变器; 开关管开路故障; 桥臂相电压平均值; 负载相电压最值; FFT; BP神经网络; 故障诊断

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)08-3058-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808029

Open Circuit Fault Diagnosis Strategy for Switch of Three Level Inverter

Shen Yanxia^{1,2}, Miao Beibei^{1,2}

(1. The Internet of Things Technology Application Engineering Research Center of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Fault diagnosis of switch is the premise of reliable operation of three-level-inverter under the fault of the switch. Taking simple open circuit fault of the diode neutral point clamped (NPC) three level inverter as an example, the open circuit fault diagnosis method based on the combination of online and offline diagnoses is proposed. The fault phase is detected by the mean value of the bridge arm phase voltages. In the time domain, the fault switch tube is diagnosed by the maximum and minimum values of the load phase voltages. In the frequency domain, the amplitude of the fault signal is extracted by the fast Fourier transform (FFT), and the open circuit fault diagnosis of the NPC three-level-inverter is realized by using the BP neural network. Simulation results show that this method can greatly reduce the workload and improve the accuracy of fault diagnosis.

Keywords: NPC three-level-inverter; open circuit faults of switches; bridge arm phase voltages mean value; load phase voltages maximum and minimum values; FFT; BP neural network; fault diagnosis

引言

与传统的两电平逆变器相比, 三电平逆变器输

出电压因其波形谐波含量低, 电压容量高等优点已被广泛应用于牵引驱动系统^[1]。但是, 三电平逆变电路的开关器件数目较多, 故障率显著提高, 短路故障、开路故障是开关管的常见故障, 当发生短路故障时, 三电平逆变电路会通过自身的熔断器将其转换为开路故障。任何一个开关器件故障都可能导致整个电路停止工作, 造成不可估量的经济损失^[2],



收稿日期: 2016-11-02 修回日期: 2017-02-08;
基金项目: 国家自然科学基金(61573167, 61572237);
作者简介: 沈艳霞(1973-), 女, 山东, 博士, 教授, 研究方向为新能源控制技术, 电机非线性控制; 苗贝贝(1993-), 女, 江苏, 硕士生, 研究方向为多电平逆变器的故障诊断。

<http://www.china-simulation.com>

• 3058 •

因此,及时进行三电平逆变器的开关管开路故障诊断对于提高系统可靠性具有重大意义。

目前,三电平逆变器的开路故障诊断方法主要以 NPC 三电平逆变器为研究对象,其诊断方法包括基于模型、基于信号和基于知识的方法,然而逆变器具有强非线性,其故障在时域内难以区分,需将其转换到频域内提取故障特征,以提高诊断的准确性^[3]。所以在逆变器的故障诊断中多采用基于信号和基于知识的方法,如经 FFT、小波变换提取故障特征,利用神经网络、支持向量机进行故障诊断^[4-6]。但这类离线诊断方法需要对大量的故障数据进行学习、训练,工作量很大。

为了提高故障诊断速度,降低计算工作量,有学者基于 NPC 三电平逆变电路的模型进行开关管开路故障诊断^[7-10],其诊断方法主要分为电流法和电压法。电流法主要是利用逆变电路的开关器件电流和输出电流的故障特征,进行开关管开路故障诊断^[11-12]。但电流容易受到负载变化的影响,导致故障诊断的准确率下降。电压法则是根据逆变电路的桥臂相电压、负载相电压及输出线电压的故障特征,进行开关管开路故障诊断^[13-14]。电压不受负载变化的影响,具有很强的鲁棒性和抗干扰性,但它只适用于单管开路故障诊断。

本文针对 NPC 三电平逆变器的简单开路故障,分析了开关管开路故障下负载相电压的最值变

化特征,提出了基于桥臂相电压和负载相电压的简单开路故障诊断方法,利用桥臂相电压的平均值检测故障相,利用故障相的负载相电压的最值定位故障开关管,但该诊断方法只适用于电压电流的相位差 $\Delta\phi < \varphi_1$ (定义电流为零时, $U_{AN} = +1/3U_d$ 时所对应的角度为 φ_1) 的情况。因此,针对 $\Delta\phi > \varphi_1$ 的情况,利用 FFT 变换提取故障信号谐波的幅值,输入到故障相对应的 BP 神经网络中,实现 NPC 三电平逆变器的开关管开路故障诊断。这种将在线和离线相结合的故障诊断方法诊断速度快、准确性高。

1 NPC 三电平逆变器的工作原理

NPC 三电平逆变器的 A 相桥臂等效电路如图 1 所示。以 A 相为例,分析该逆变器的工作情况。

P 状态(仅 QA1QA2 通)如图 1(a)所示,电流为正(图中实线方向),流过 QA1、QA2; 电流为负(图中虚线方向),流过 D1、D2, $U_{AO} = +1/2U_d$ 。O 状态(仅 QA2QA3 通)如图 1(b)所示,电流为正,流过 D5 和 QA2; 电流为负,流过 QA3 和 D6, $U_{AO} = 0$ 。N 状态(仅 QA3QA4 通)如图 1(c)所示,电流为正,流过 D3、D4; 电流为负,流过 QA3、QA4, $U_{AO} = -1/2U_d$ 。

NPC 三电平逆变器的开关状态如图 2 所示。

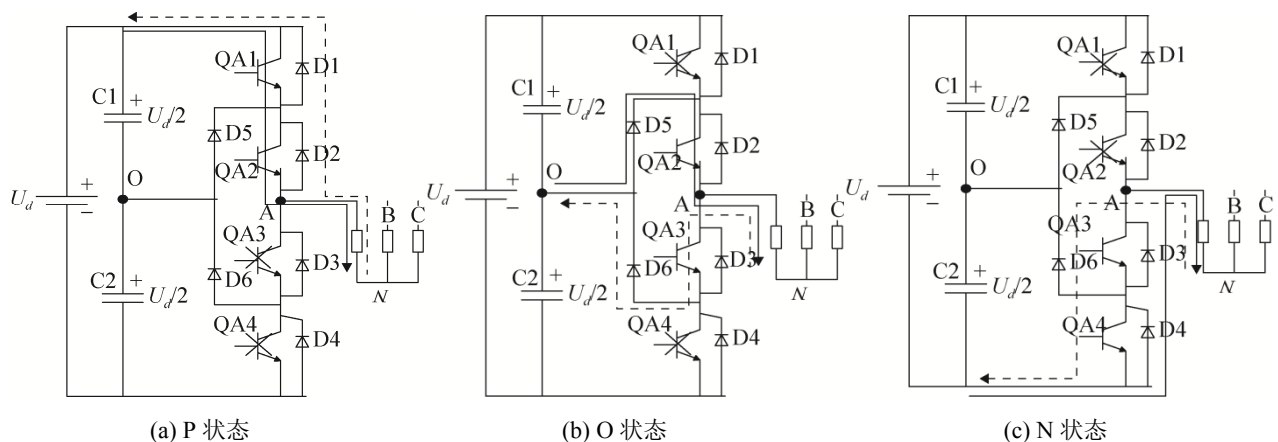


图 1 NPC 三电平逆变电路 A 相桥臂等效图

Fig.1 Equivalent diagram of A phase bridge arm of NPC three-level-inverter

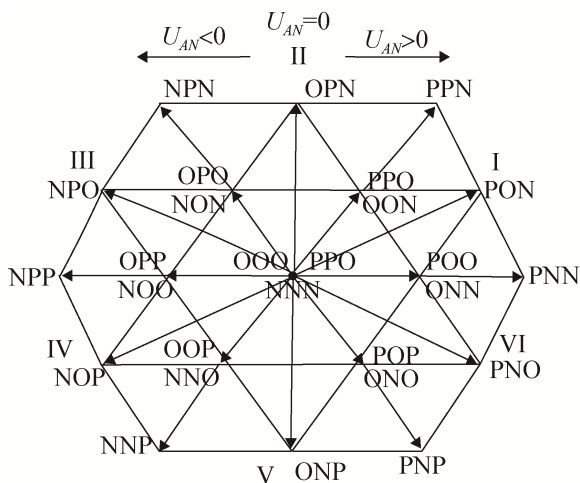


图2 NPC 三电平逆变器的开关状态
Fig.2 Switch status of NPC three-level-inverter

若定义开关函数 $S_i = 1, 0, -1 (i = a, b, c)$ 分别表示 P、O、N 状态，则桥臂相电压可以表示为：

$$U_{AO} = \frac{S_a}{2}U_d; \quad U_{BO} = \frac{S_b}{2}U_d; \quad U_{CO} = \frac{S_c}{2}U_d \quad (1)$$

从而，负载相电压为：

$$\begin{bmatrix} U_{AN} \\ U_{BN} \\ U_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} U_{AB} - U_{CA} \\ U_{BC} - U_{AB} \\ U_{CA} - U_{BC} \end{bmatrix} = \frac{1}{6}U_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 简单开路故障下 NPC 三电平逆变器的故障特征分析

定义正常运行、单管开路故障及单相桥臂上下半桥各有一个开关管的开路故障为简单开路故障，共 25 种。鉴于电路的对称性，取正常运行、QA1、QA2 开关管开路故障进行故障特征分析。

2.1 正常状态下三相负载相电压的最值特征分析

正常状态下，由式(2)得 A 相负载相电压 $U_{AN} = 1/6U_d[2S_a - S_b - S_c]$ ，所以， $U_{AN(max)} = +2/3U_d$ ； $U_{AN(min)} = -2/3U_d$ 。同理可得 B、C 相负载相电压的最大值和最小值。

2.2 QA1 开关管开路故障下三相负载相电压的最值特征分析

当 $S_a = -1$ 时，QA1 管开路故障对该状态无影响，由式(2)得 $U_{AN} = 1/6U_d[-(2 + S_b + S_c)]$ ，所以， $U_{AN(max)} = -1/6U_d$ ， $U_{AN(min)} = -2/3U_d$ 。

当 $S_a = 0$ 时，QA1 管开路故障对该状态无影响，同理可得 $U_{AN} = 1/6U_d[-(S_b + S_c)]$ ， $U_{AN(max)} = +1/3U_d$ ， $U_{AN(min)} = -1/3U_d$ 。

当 $S_a = 1$ 且电流为正时如图 1(a)实线所示，QA1 管开路故障，电流经 D5 和 QA2 流向负载端，电路变为 O 状如图 2 中的 PPO 等，与上述 $S_a = 0$ 的分析过程类似。但 PPN/PON 等开关状态无法转变为 O 状态，电流变为 0。若电压电流的相位差 $\Delta\phi = 0^\circ$ ，则 $U_{AN} = 0$ 。若 $\Delta\phi \in (0^\circ, \varphi_1)$ (定义电流为零时， $U_{AN} = +1/3U_d$ 时所对应的角度为 φ_1)， $U_{AN(max)} = U_{AN(min)} = +1/6U_d$ 。若 $\Delta\phi \in [\varphi_1, 90^\circ)$ ， $U_{AN(max)} = +1/2U_d$ ， $U_{AN(min)} = +1/3U_d$ 。若 $\Delta\phi = 90^\circ$ ， $U_{AN(max)} = U_{AN(min)} = +2/3U_d$ 。

当 $S_a = 1$ 且电流为负时如图 1(a)虚线所示，QA1 管开路故障对该状态无影响。若 $\Delta\phi \in (0^\circ, \varphi_1)$ ，电流为负时， $U_{AN} < +1/3U_d$ ，所以， $U_{AN(max)} = U_{AN(min)} = +1/6U_d$ 。若 $\Delta\phi \in [\varphi_1, 90^\circ]$ ，同理可得 $U_{AN(max)} = +1/2U_d$ ， $U_{AN(min)} = +1/6U_d$ 。

综上所述，QA1 故障时，若 $\Delta\phi \in [0^\circ, \varphi_1)$ ， $U_{AN(max)} = +1/3U_d$ ， $U_{AN(min)} = -2/3U_d$ ；若 $\Delta\phi \in [\varphi_1, 90^\circ)$ ， $U_{AN(max)} = +1/2U_d$ ， $U_{AN(min)} = -2/3U_d$ ；若 $\Delta\phi = 90^\circ$ ， $U_{AN(max)} = +2/3U_d$ ， $U_{AN(min)} = -2/3U_d$ 。同理可得 B、C 相负载相电压的最大值和最小值。

2.3 QA2 开关管开路故障下三相负载相电压的最值特征分析

当 $S_a = -1, 1$ 时，QA2 管和 QA1 管开路故障的分析类似。

当 $S_a = 0$ 且电流为正时(图 1(b)实线所示)，QA2 管开路故障，流经 D5 和 QA2 的电流无法形成通路，电流变为 0。若 $\Delta\phi = 0^\circ$ ，则 $U_{AN} = 0$ 。若

$\Delta\phi \in (0^\circ, \varphi_1)$, 电流为零时, 正半周内 $U_{AN} \in (0, +1/3U_d)$, 负半周内 $U_{AN} \in (-1/3U_d, 0)$, 所以, $U_{AN(\max)} = +1/6U_d$, $U_{AN(\min)} = -1/6U_d$ 。若 $\Delta\phi \in [\varphi_1, 90^\circ]$, 同理可得 $U_{AN(\max)} = +1/3U_d$, $U_{AN(\min)} = -1/3U_d$ 。

当 $S_a = 0$ 且电流为负时(图 1(b)虚线所示), QA2 管开路故障对该状态无影响。若 $\Delta\phi = 0^\circ$, 则 $U_{AN} < 0$, 所以 $U_{AN(\max)} = -1/6U_d$, $U_{AN(\min)} = -1/3U_d$ 。若 $\Delta\phi \in (0^\circ, \varphi_1)$, 同理可得 $U_{AN(\max)} = +1/6U_d$, $U_{AN(\min)} = -1/6U_d$ 。若 $\Delta\phi \in [\varphi_1, 90^\circ]$, 同理可得 $U_{AN(\max)} = +1/3U_d$, $U_{AN(\min)} = -1/3U_d$ 。

综上所述, QA2 故障时, 若 $\Delta\phi = 0^\circ$, $U_{AN(\max)} = 0$, $U_{AN(\min)} = -2/3U_d$; 若 $\Delta\phi \in (0^\circ, \varphi_1)$, $U_{AN(\max)} = +1/6U_d$, $U_{AN(\min)} = -2/3U_d$; 若 $\Delta\phi \in [\varphi_1, 90^\circ]$, $U_{AN(\max)} = +1/2U_d$, $U_{AN(\min)} = -2/3U_d$; 若 $\Delta\phi = 90^\circ$, $U_{AN(\max)} = +2/3U_d$, $U_{AN(\min)} = -2/3U_d$ 。同理可得 B、C 相负载相电压的最大值和最小值。

3 NPC 三电平逆变器的开关管开路故障诊断

由上述分析可得 A 相桥臂发生简单开路故障

的三相负载相电压的幅值特征表, 见表 1~2。

3.1 $\Delta\phi \in [0^\circ, \varphi_1]$ 的简单开路故障诊断

由表 1 知, 利用 $U_{AN(\max)}$ 可将 8 种故障分为三大类。其中 $U_{AN(\max)} > +1/3U_d$ 为第“ I ”大类故障; $U_{AN(\max)} < +1/3U_d$ 为第“ II ”大类故障; 否则为第“ III ”大类故障。不难发现, 三大类故障下的每种故障的 $U_{AN(\min)}$ 各不相同, 因此, 利用 $U_{AN(\min)}$ 可定位出故障开关管。同理利用 U_{BN}/U_{CN} 的最值特征可分别诊断出 B/C 相的 8 种开路故障。

因此, 诊断出故障相便可识别出 25 种简单开路故障。由图 2 知, 正常状态下 P/O 状态、N/O 状态各为半个周期, 且 P、N 状态对称分布, 因此, 每个周期内的各相桥臂相电压的平均值均为零。以 A 相为例, 分析不同开路故障下桥臂相电压的平均值($\overline{U_{AO}}$)特征。

若 QA1 开路故障, 仅影响 P 状态且电流为正的情况, 该状态下电流经 D5 和 QA2 流向负载端, P 状态变为 O 状态, P 状态减少, P、N 状态不对称, 每个周期内的 $\overline{U_{AO}} \neq 0$ 。同理 QA2/QA3/QA4/QA1QA3/QA2QA4 开路故障下, 每个周期内的 $\overline{U_{AO}} \neq 0$ 。

表 1 三相负载相电压最值特征($\Delta\phi \in [0^\circ, \varphi_1]$)

Tab.1 Amplitude characteristics of three-phase load phase voltages ($\Delta\phi \in [0^\circ, \varphi_1]$)

故障名称	故障大类	故障开关管	U_{AN} 最大最小值	U_{BN} 最大最小值	U_{CN} 最大最小值	标号
简单开路故障	I	QA3 故障	$+2/3U_d - 1/6U_d/0$	$+1/2U_d - 2/3U_d$	$+1/2U_d - 2/3U_d$	3
		QA4 故障	$+2/3U_d - 1/3U_d$	$+1/2U_d - 2/3U_d$	$+1/2U_d - 2/3U_d$	4
	II	QA2 故障	$0/+1/6U_d - 2/3U_d$	$+2/3U_d - 1/2U_d$	$+2/3U_d - 1/2U_d$	2
		QA2QA3 故障	$+0/-0$	$+1/2U_d - 1/2U_d$	$+1/2U_d - 1/2U_d$	7
		QA2QA4 故障	$0/+1/6U_d - 1/3U_d$	$+1/2U_d - 1/2U_d$	$+1/2U_d - 1/2U_d$	8
		QA1 故障	$+1/3U_d - 2/3U_d$	$+2/3U_d - 1/2U_d$	$+2/3U_d - 1/2U_d$	1
	III	QA1QA3 故障	$+1/3U_d - 1/6U_d/0$	$+1/2U_d - 1/2U_d$	$+1/2U_d - 1/2U_d$	5
		QA1QA4 故障	$+1/3U_d - 1/3U_d$	$+1/2U_d - 1/2U_d$	$+1/2U_d - 1/2U_d$	6

表 2 三相负载相电压最值特征($\Delta\phi \in [\varphi_1, 90^\circ]$)

Tab.2 Amplitude characteristics of three-phase load phase voltages ($\Delta\phi \in [\varphi_1, 90^\circ]$)

故障名称	故障开关管	U_{AN} 最大最小值	U_{BN} 最大最小值	U_{CN} 最大最小值
简单	QA1/QA2 故障	$+1/2U_d/+2/3U_d - 2/3U_d$	$+2/3U_d - 2/3U_d$	$+2/3U_d - 1/2U_d$
故障	QA3/QA4 故障	$+2/3U_d - 1/2U_d - 2/3U_d$	$+2/3U_d - 2/3U_d$	$+1/2U_d - 2/3U_d$

若 QA1QA4 开路故障, QA1 开路故障仅影响 P 状态且电流为正的情况, QA4 开路故障仅影响 N 状态且电流为负的情况, 两者影响互补, 因此, 每个周期内的 $\overline{U_{AO}} = 0$ 。同理 QA2QA3 开路故障下 $\overline{U_{AO}} = 0$ 。由上述分析知, QA1 开路故障, P 状态会减少, 同理 QA4 开路故障, N 状态会减少, 以此类推, QA1QA4 和 QA2QA3 开路故障下 P、N 状态都会减少。因此, 正半周内的 $\overline{U_{AO}}$ 小于正常状态下 $\overline{U_{AO}}$; 负半周内的 $\overline{U_{AO}}$ 大于正常状态下 $\overline{U_{AO}}$ 。所以, 若一个周期内某相桥臂相电压的平均值为 0, 还需计算半个周期内该相桥臂相电压的平均值, 判断其是否等于正常状态下桥臂相电压的平均值来诊断该相是否故障。

因此, 可得简单开路故障诊断原理, 具体包括如下步骤:

(1) 利用桥臂相电压的平均值诊断故障相。在 $T_s = 1/f$ 内求取每相桥臂相电压的平均值, 若某相桥臂相电压的平均值不为零, 则为该相桥臂故障; 否则, 可能为正常状态、Qi1Qi4 故障、Qi2Qi3 故障($i=A, B, C$)。在半个周期内, 再次求取该相桥臂相电压的平均值, 若其不等于正常状态下桥臂相电压的平均值, 则为该相桥臂故障, 否则为正常状态。

(2) 判断 $\Delta\phi$ 是否小于 ϕ_1 (即电流为负时, 故障相的负载相电压是否恒小于 $+1/3U_d$)。若是, 转步骤(3); 若否, 利用故障相对应的 BP 神经网络进行开路故障诊断, 具体见 3.2 节。

(3) 利用故障相的负载相电压波形的最值特征进行开路故障诊断。故障诊断分为两步, 以 A 相为例进行说明:

1) 利用表 1 中 $U_{AN(\max)}$ 将 8 种开路故障划分为三大类;

2) 利用表 1 中 $U_{AN(\min)}$ 定位故障开关管。

3.2 $\Delta\phi \in [\phi_1, 90^\circ]$ 的简单开路故障诊断

由表 2 知, QA1 和 QA2、QA3 和 QA4 故障下的三相负载相电压最值特征相同, 难以区分。为了提高故障诊断的准确率, 三相负载相电压经 $3s/2s$

变换为 $U_d - U_q$, 利用式(3)对 U_d 进行 FFT 变换, 得到各次谐波信号的幅值。在获取故障特征时, 发现不同开路故障对 U_d 的直流分量、2 次、3 次、4 次、5 次谐波的幅值影响较大, 而且这 5 个频谱分量可以对应唯一的故障类型, 因此本文将这 5 个频谱分量作为故障特征向量。最后经归一化处理后输入到故障相对应的 BP 神经网络中, 实现 NPC 三电平逆变器的开路故障诊断。

$$U(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(\frac{2\pi n t}{T}) + b_n \sin(\frac{2\pi n t}{T})] \quad (3)$$

各次谐波的幅值:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4)$$

BP 神经网络是一种多层前馈神经网络, 信号前向传递, 误差反向传播。前向传递中, 输入信号从输入层经隐含层逐层处理, 直至输出层。若输出层得不到期望的输出, 则转入反向传播, 根据误差调整网络权值和阈值, 使网络输出逼近期望输出。

4 仿真研究

4.1 $\Delta\phi \in [0^\circ, \phi_1]$ 的仿真研究

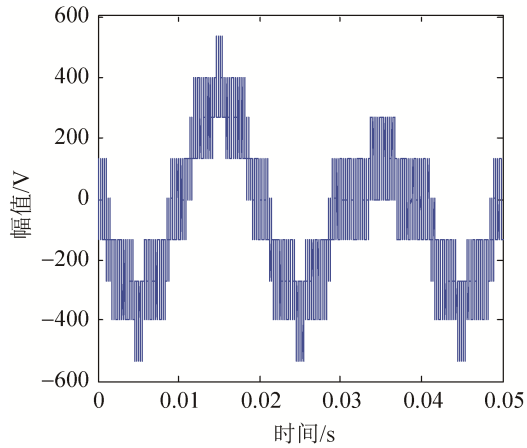
4.1.1 仿真模型

基于 simulink 建立了 NPC 三电平逆变器的仿真模型。负载为三相对称阻感负载, $P = 10e3W$, $QL = 1000$, $f_N = 50Hz$, 仿真时间 $T = 0.05s$ 。以 QA1 单管开路故障为例, 取 $U_d = 800V$ 进行仿真验证。

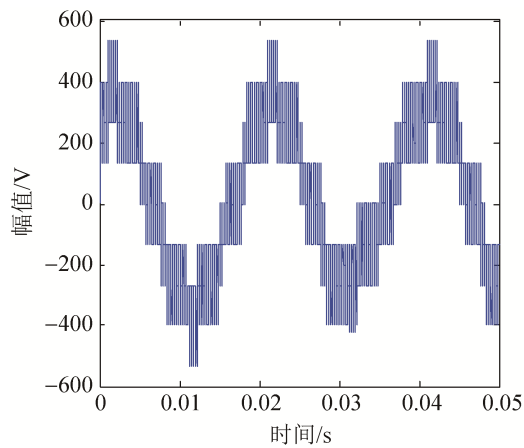
4.1.2 仿真结果分析

设置 $T = 0.02s$ 时 QA1 开路故障, 由图 3 知, 正常状态下三相负载相电压均输出九种电平。QA1 开路故障后, $U_{AN(\max)} = +1/3U_d$, $U_{AN(\min)} = -2/3U_d$, $U_{BN(\max)} = U_{CN(\max)} = +2/3U_d$, $U_{BN(\min)} = U_{CN(\min)} = -1/2U_d$, 与表 1 中的结论一致; 由图 4 知, 正常状态下的三相桥臂相电压的输出波形对称, 一个周期内 $\overline{U_{AO}} = \overline{U_{BO}} = \overline{U_{CO}} = 0$ 。QA1 开路故障后, 仅 U_{AO} 输出波形不对称, 一个

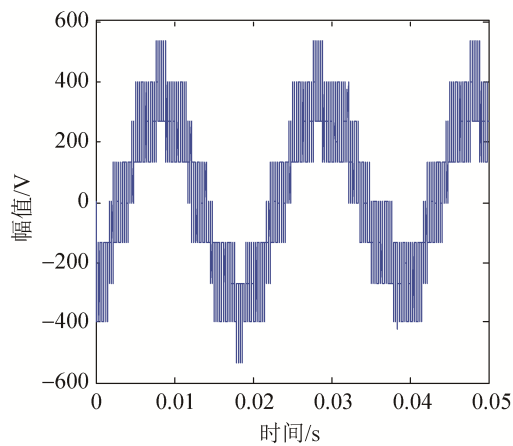
周期内 $\overline{U_{AO}} \neq 0$ 。由图 5 可见, QA1 开路故障后恒输出 1, 其他开关管均输出 0, 由表 1 知标号为 1 为 QA1 开路故障, 验证了该诊断方法的正确性。



(a) A 相负载相电压



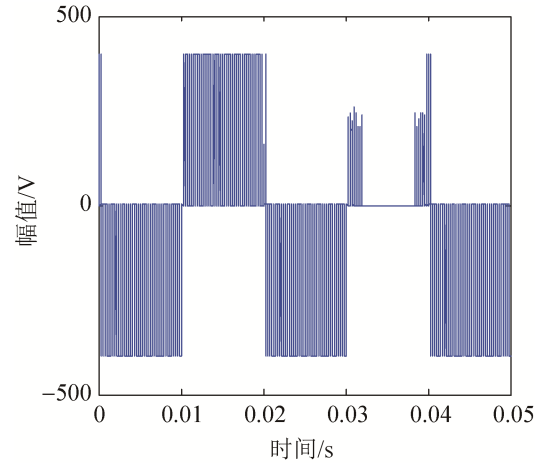
(b) B 相负载相电压



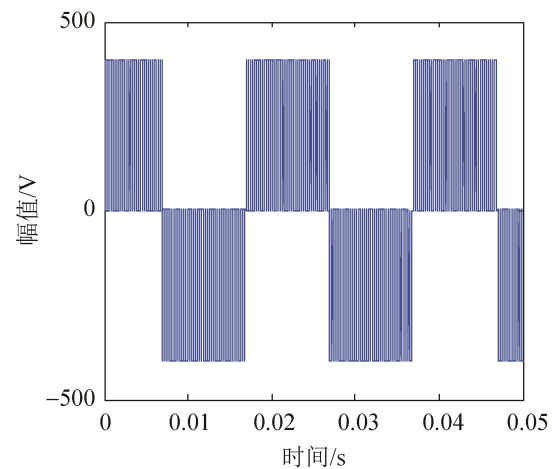
(c) C 相负载相电压

图 3 QA1 故障下, 三相负载相电压的输出波形

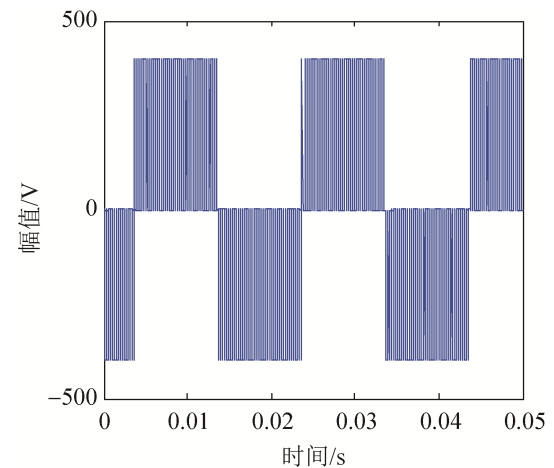
Fig.3 Output waveform of three-phase load phase voltages under QA1 fault



(a) A 相桥臂相电压



(b) B 相桥臂相电压



(c) C 相桥臂相电压

图 4 QA1 故障下, 三相桥臂相电压的输出波形

Fig.4 Output waveform of the three-phase bridge arm phase voltages under QA1 fault

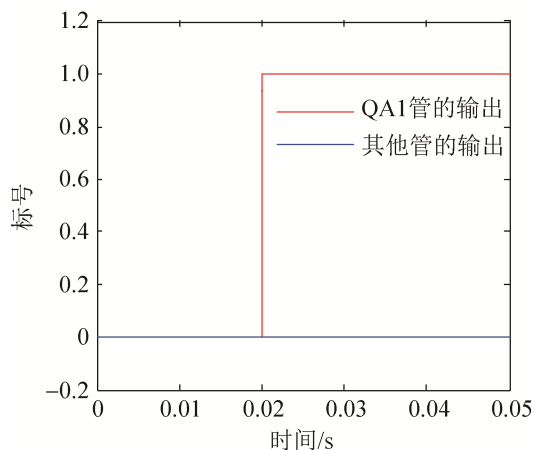


图5 QA1 开关管开路故障下的诊断结果

Fig.5 Diagnosis results of open circuit fault in QA1 switch

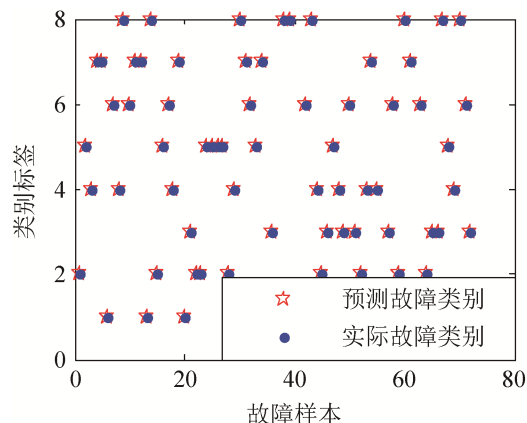


图6 BP1神经网络分类结果图

Fig.6 BP1 neural network classification results chart

4.2 $\Delta\phi\in[\phi_1,90^\circ]$ 的仿真研究

4.2.1 仿真模型

以 A 相为例进行仿真研究。BP1 神经网络的参数设置如下：输入层为 5 个神经元，对应于 U_d 的 5 个频谱分量；隐层神经元越多则精度越高，但网络亦趋于复杂，隐层神经元过少则精度下降，甚至出现不收敛的结果^[15]，经多次试验，隐层设定为 30 个神经元时，网络能够快速收敛且输出效果最好；输出层为 8 个神经元，用来定位故障开关管。BP 神经网络采用附加动量法作为权值和阈值的学习算法，学习率 $xite=0.01$ ， $alfa=0.2$ ，训练次数为 500 次，训练误差 $E(ii)=0$ 。

本文分别在 $U_d=400\text{V}, 600\text{V}, 800\text{V}$ 下取 11 组不同的负载模拟各种 IGBT 开路故障，根据 FFT 变换提取 5 个频谱作为故障特征向量，共得到 264 组故障特征向量，随机选取 192 组作为每个神经网络的训练数据，72 组作为测试数据。

4.2.2 仿真结果分析

对同一个测试集进行故障分类，得到图 6 所示的 BP1 神经网络分类结果图。图 6 中红色五角星代表预测故障类别，蓝色圆点代表实际故障类别，由图 6 可见，预测故障类别和实际故障类别完全重合，故障识别率高达 100%，从而证明该诊断方法的有效性。

5 结论

本文提出了一种新颖的三电平逆变器的开关管开路故障诊断方法，该诊断方法将在线诊断和离线诊断相结合，实现 NPC 三电平逆变器的简单开路故障诊断。该诊断方法利用桥臂相电压的平均值进行故障检测，针对时域内可以区分的故障类型，利用负载相电压的最值定位故障开关管；针对时域内难以区分的故障类型，利用快速傅里叶变换 (FFT) 提取故障信号谐波的幅值，经 3 个 BP 神经网络实现 NPC 三电平逆变器的开路故障诊断。相比于基于电流的开路故障诊断方法，它不受负载变化的影响。相比于离线故障诊断方法，它不需要针对 25 种简单开路故障数据进行学习和训练，大大减少了工作量，同时也提高了诊断的准确度。

参考文献:

- [1] Jiangbiao He, Nabeel A O. Demerdash. Diagnosis of Open-Circuit Switch Faults in Multilevel Active-NPC Inverters [C]// IEEE Transportation Electrification Conference. Beijing, China: IEEE, 2014: 8-14.
- [2] 康利平. 光伏三电平逆变器的故障建模及其诊断方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015: 1-77.
Liping Kang. Research on Fault modeling and diagnosis method of photovoltaic three level inverter[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015: 1-77.
- [3] Ting Yang, Haibo Pen, Zhaoxia Wang. Feature Knowledge Based Fault Detection of Induction Motors Through the Analysis of Stator Current Data [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement

- (S0018-9456), 2016, 65(3): 549-558.
- [4] Tianzhen Wang, Hao Xu, Jingang Han. Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter System Fault Diagnosis Using a PCA and Multiclass Relevance Vector Machine Approach [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2015, 30(12): 7006-7018.
- [5] Hao Xu, Tianzhen Wang, Jian Zhang, et al. RPCA-SVM Fault Diagnosis Strategy of Cascaded H-bridge Multilevel Inverters[C]//2014 First International Conference on Green Energy. Beijing, China: IEEE, 2014: 164-169.
- [6] MohammadRezaVazifeh, FarzanehAbbasi Hossein Abadi. Fault Diagnosis based on Wavelet Entropy Feature Extraction and Information Fusion [C]//2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering. Shanghai, China: IEEE, 2015: 234-238.
- [7] Feng Wu, Jin Zhao. A Real-Time Multiple Open-Circuit Fault Diagnosis Method in Voltage-Source-Inverter Fed Vector Controlled Drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2016, 31(2): 1425-1437.
- [8] Bin Gou, Xinglai Ge, Shunliang Wang, et al. An Open-Switch Fault Diagnosis Method for Single-Phase PWM Rectifier Using a Model-Based Approach in High-Speed Railway Electrical Traction Drive System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2016, 31(5): 3816-3826.
- [9] Joachim Druant, Thomas Vyncke, Frederik De Belie, et al. Adding Inverter Fault Detection to Model-Based Predictive Control for Flying-Capacitor Inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2015, 62(4): 2054-2062.
- [10] Feng Wu, Jin Zhao, Yang Liu. Symmetry-analysis-based diagnosis method with correlation coefficients for open-circuit fault in inverter [J]. Electronics Letters (S0013-5194), 2015, 51(21): 1688-1690.
- [11] Ehsan Jamshidpour, Philippe Poure, EskandarGholipour, et al. Single-Switch DC-DC Converter With Fault-Tolerant Capability Under Open-and Short-Circuit Switch Failures [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2015, 30(5): 2703-2712.
- [12] June-Seok Lee, Kyo-Beum Lee. An Open-Switch Fault Detection Method and Tolerance Controls Based on SVM in a Grid-Connected T-Type Rectifier With Unity Power Factor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2014, 61(12): 7092-7103.
- [13] Shu Cheng, Ya-ting Chen, Tian-jian Yu, et al. A Novel Diagnostic Technique for Open-Circuited Faults of Inverters Based on Output Line-to-Line Voltage Model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2016, 11(9): 1109-1120.
- [14] Yuxi Wang, Zhan Li, Hao Ma. Comparison of Two Diagnosis Methods Based on Switching Voltage Pattern for IGBTs Open-Circuit Faults in Voltage-Source Inverters [C]//2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2015: 257-262.
- [15] Cui Chen, Danjiang Chen, Yinzong Ye. The Neural Network-based Diagnostic Method for Atypical Faults in NPC Three-Level Inverter [C]//IEEE 25th Chinese Control and Decision Conference. Guiyang, China: IEEE, 2013: 4740-4745.