

3상 전류 불균형에 따른 제곱평균제곱근 대비 평균 비율 분포에 기반한 3상 인버터 개방 고장 분류 방법

최도현, 이가현
이화여자대학교 전기전자공학과

Three-phase inverter open circuit fault classification using mean to RMS current ratio

Dohyun Choi and Kahyun Lee
Department of Electronic and Electrical Engineering, Ewha Womans University

ABSTRACT

본 논문에서는 전류 신호 기반 3상 인버터의 개방 고장 분류 방법에 대해 제안한다. 제안된 방법은 구동 중 전류 신호의 왜곡에 의한 특징을 나타내는 mean/RMS 비를 지표로 활용하여, 해석이 가능한 알고리즘으로 개방 고장을 6개의 클래스로 분류할 수 있다. Mean/RMS 비는 부하의 변화에 민감하지 않아 다양한 어플리케이션에서 적용이 가능한 지표이다. 제안된 분류 방법은 시뮬레이션을 통해서 검증되었다.

1. 서 론

3상 인버터 회로(그림1)의 스위치는 높은 전압 스트레스로 인해 단락이나 개방 고장에 취약해지며, 개방 고장은 즉각적인 작동 중단을 발생시키지는 않지만 drive 회로나 부하 고장을 초래할 수 있어 고장 진단이 필요하다^[1]. 개방 고장은 고장 스위치의 개수에 따라 single, double과 triple 개방으로 나눌 수 있다. 개방 고장 진단을 위한 방법에는 전압이나 전류 같은 신호를 사용하는 신호기반 방법, 수학적 모델을 사용하는 모델기반 방법, 머신러닝을 사용하는 데이터 기반의 방법이 있다^[2]. 그 중 신호기반 방법은 구동 중 진단이 가능하여 운전에 영향을 주지 않는다는 장점이 있다. 전압을 사용하는 방법은 average와 RMS 값을 활용하여 개방 위치 고장 진단하지만 전압을 측정하기 위한 추가적인 회로가 필요하다^[3]. 추가적인 측정회로가 필요하지 않은 전류를 활용하여, 개방 고장별로 전류 신호가 달라지는 특징을 이용한 방법도 있다. [2]의 방법은 신호기반과 데이터 기반을 결합한 방법으로, 전류의 mean/RMS의 비를 사용하여 부하 의존도를 제거하고 머신러닝을 사용하여 높은 정확도로 개방 위치 고장 진단을 한다. 그러나 학습을 위해 많은 연산량을 요구하는 AI를 활용하는 방법으로, 본 논문에서는 알고리즘 기반 진단을 통해 연산량, 메모리 소모량을 완화하면서 진단 정확도에 대한 정확한 예측이 가능한 고장 진단 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법에서는 개방 개수와 전류 형태를 기준으로 총 7개의 클래스(정상 1, 고장 6)로 구분한다. 정상은 전류 RMS 값으로 고장 경우와 구분하며, 나머지 6개 고장 클래스에 대해서는 3상 전류의 mean/RMS 비를 사용하여 4개로 구분하고 3상 전류 비율의 합과 3상 전류 비율의 절대 값 합을

이용하여 추가적인 분류를 진행한다.

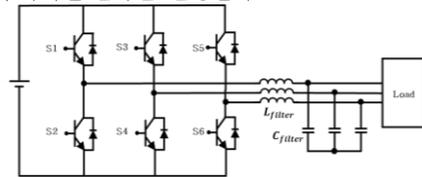


그림1 3상 인버터 회로도
Fig.1 Three-phase inverter topology

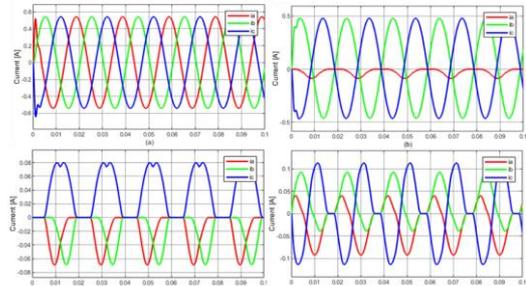


그림2 상전류 신호 파형 (a) 정상 (b) S1 개방 고장 (c) S1&3 개방 고장 (d) S1&4 개방 고장
Fig.2 Phase current waveform (a) healthy (b) S1 open fault (c) S1&3 open fault (d) S1&4 open fault

2. mean/RMS 비를 활용한 Fault 분류 방법

2.1 mean/RMS 비의 계산

사용된 전류의 mean 방정식은 다음과 같다.

$$i(k)_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{a=0}^{N-1} i(k-a) \tag{1}$$

식(1)에서 N은 일정 기간, k는 현재 시점, a는 현재시점부터 (N-1)개의 과거 시점을 나타낸다. 전류의 RMS 방정식은 다음과 같다.

$$i(k)_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{a=0}^{N-1} (i(k-a))^2} \tag{2}$$

mean/RMS 비는 식(1)을 식(2)으로 나누어 정리된 식(3)을 사용하여 값을 구한다.

$$i(k)_{mean/RMS} = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sum_{a=0}^{N-1} i(k-a)}{\sqrt{\sum_{a=0}^{N-1} (i(k-a))^2}} \tag{3}$$

그림2는 정상 및 고장 시 상전류 신호 파형을 보여주는데,

그림2(a)와 같이 균형된 파형의 3상 전류는 0을 중심으로 진동을 하기 때문에 0의 mean 값을 가지게 된다. 개방 고장이 발생하면 파형의 왜곡이 발생하면서 mean 값이 0이 아니게 된다. RMS 값은 전류 파형의 절대적인 크기를 나타내기 때문에 전류의 크기와 형태에 따라서 값을 갖게 된다. Mean/RMS 비는 전류를 균형 정도, 크기와 형태에 따라서 불균형의 정도를 구분 짓는 지표로 볼 수 있다.

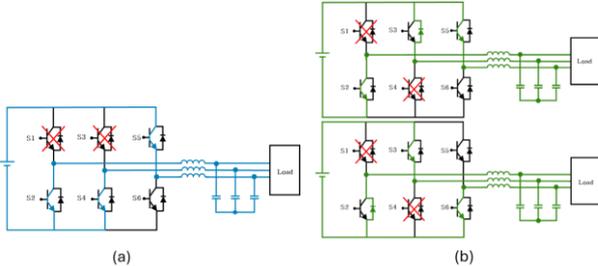


그림3 개방 고장 시 전류 흐름 (a) S1&3 개방 고장 (b) S1&4 개방 고장

Fig.3 Open fault current path (a) S1&3 open fault (b) S1&4 open fault

2.2 mean/RMS 비 분석

그림2(c)와 (d)의 전류 신호를 회로의 전류 흐름으로 나타내면 그림 3과 같다. 그림3(a)의 전류 흐름은 스위치 S1과 S3이 개방되어 전류가 흐르지 못하는 상태이며, 스위치 S5에 흐른 전류가 스위치 S2와 S4를 통해 나가고 스위치 S6은 on이 되더라도 전류의 흐름이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 3상 전류의 파형을 보면 양/음수가 교차하는 형태가 아니기 때문에 mean 값이 0이 아니게 되고 3상의 mean/RMS 비도 0이 아닌 숫자로 나타난다. 그림 3(b)의 전류 흐름은 스위치 S1과 S4가 개방된 상태로 전류의 흐름이 스위치 S5에서 S2와 S3으로 나가는 경우와 스위치 S3에서 S2와 S6으로 나가는 경우로 이해할 수 있다. a와 b상 전류는 왜곡이 있어 mean 값이 0이 아니고 c상은 0인 것을 알 수 있다. Mean/RMS 비의 a와 b 상 값은 0이 아니고 c 상 값은 0임을 이해할 수 있다. Mean과 RMS는 부하 변화에 변화 폭이 큰데 반해, mean/RMS 비는 신호의 분포를 절대적인 크기의 값으로 나누어 전류 신호의 표준화된 크기와 형태 특징만을 이용하기 때문에 부하 변화에 민감하지 않아 비교적 여러 부하 상황에서 고장 진단에 사용 가능하다.

2.3 Fault 분류 방법

스위치 개방은 single, double, triple로 나눌 수 있으며 single 1개, double 3개, triple 3개로 개방 위치별 특징에 따라 총 7개의 종류로 구분될 수 있다. 그림2(b),(c),(d)는 각각 single, double 2, double 3로 구분된다. 제안된 방법에서는 RMS를 이용하여 정상과 고장으로 구별하고, 각 상의 mean/RMS 비를 이용하여 4개의 그룹으로 분류할 수 있다. 2개 이상의 종류를 모두 포함하고 있는 그룹의 경우에는 추가적인 임계 값을 이용해서 각각의 클래스로 분류가 가능하다. 표1과 같이 고장 클래스를 6개로 분류 가능하고 정상을 포함하여 총 7개의 클래스로 구분될 수 있다. 그림4의 플로우차트를 보면, 3상 전류의 RMS가 모두 0이 아닌 값(nonzero, 1)을 갖는 경우 정상으로 구분하고, 0인 값(zero,

0)이 있는 경우를 고장으로 구분된다. 3상 Mean/RMS 비의 값이 모두 nonzero이면 그룹3, 2상만 값이 nonzero이면 그룹4, 1상만 값이 nonzero이면 그룹1(클래스1), 모두 zero이면 그룹 2로 구분된다. 그룹3은 3상 mean/RMS 합계가 nonzero이면 클래스2로, 아니면 클래스5으로 구분된다. 그룹4는 3상 mean/RMS 절대 값의 합계가 임계 값보다 크면 클래스3, 작으면 클래스4로 구분된다. 클래스 분류를 위한 임계 값은 시뮬레이션이나 실험을 통해 설정할 수 있다.

표1 Fault 분류표

Table.1 Fault classification

Fault Types	Characteristics	Group	Classification
Single	1 upper or 1 lower open	1	class 1
Double 1	1 upper, 1 lower open (same leg)	2	Class 6
Double 2	1 upper, 1 lower open (different legs)	3	class 2
Double 3	2 upper or 2 lower open	4	class 3
Triple 1	3 upper or 3 lower open	2	Class 6
Triple 2	1 leg and single open	4	class 4
Triple 3	2 upper & 1 lower or 1 upper & 2 lower open (different legs)	3	class 5

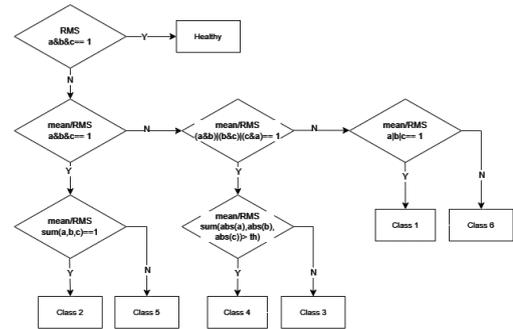


그림4 fault 분류 플로우차트

Fig.4 Fault Classification Flowchart

3. 시뮬레이션 결과

3.1 시뮬레이션 구성

표2의 파라미터 조건들을 사용하여, 그림1의 3상 인버터 회로를 스위치별로 개방된 상황을 모사할 수 있는 시뮬레이션 환경을 구현하고 RL 부하에서 시뮬레이션을 수행하였다.

표2 시뮬레이션에서 사용한 파라미터

Table.2 Parameters for simulation

Parameter	Value
Input Voltage	24V
Carrier Frequency	10kHz
Fundamental Frequency	50Hz
Modulation Index	0.9
Filter Inductance	5e-3H
Filter Capacitance	2.5e-5F
Load Resistance	20Ω
Load Inductance	3e-3H

3.2 부하 변화에 따른 mean/RMS 비

표3의 결과를 보면 2.2에서의 분석과 일치함을 확인할 수 있다. 고장 종류별로 mean/RMS 비의 값들의 특징이 zero와

nonzero 개수 구성에 따라 구분된다. 그림 4에서는 부하의 저항과 인덕턴스의 변화에 따라 mean/RMS 비의 변화를 나타내는데, 부하 변화에도 mean/RMS 비가 비교적 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 부하 변화 별 값의 범위를 참고하여 임계 값을 조정할 수 있다.

표3 개방 고장 종류별 mean/RMS 비
Table.3 mean to RMS ratio by open fault types

Fault Types	A	B	C
Healthy	0.00	0.00	0.00
Single	-0.67	0.04	0.04
Double type 1	0.00	0.00	0.00
Double type 2	-0.61	-0.61	0.75
Double type 3	-0.44	0.44	0.00
Triple type 1	0.00	0.00	0.00
Triple type 2	0.06	-0.62	0.62
Triple type 3	-0.43	-0.43	0.71

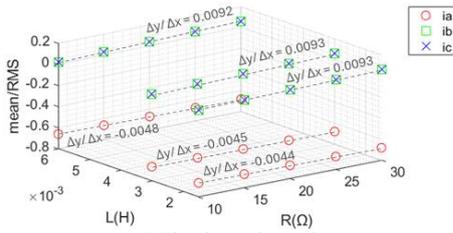


그림4 Single 개방 고장 시 부하 변화에 대한 mean/RMS 비
Fig.4 Mean/RMS ratio with change of load values in single open case

3.3 제안한 방법 적용한 고장 분류 결과

3.3.1 부하 변화 시나리오

그림 5는 0.1s에 R 부하가 10Ω에서 20Ω으로 상승하는 경우로 구동 중 전류가 감소하는 상황을 나타낸다. 부하 변화가 발생해도 mean/RMS비가 유지되며, 고장 클래스 결과도 동일하게 나오는 것을 확인할 수 있다. Mean과 RMS 계산에 필요한 0.02초 이외에 일정한 mean/RMS 비가 도출되는 시간이 지연되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 갑작스러운 부하 변화에 따른 과도상태이며 정상상태 도달까지 시간이 소요되는 것으로 이해할 수 있다. Mean/RMS 비는 부하 변화에 강한 지표이지만, 부하의 값이 너무 작아지거나 커지면 같은 임계 값을 이용해서 고장을 구분할 수 없어 임계 값 재설정 필요할 수 있다.

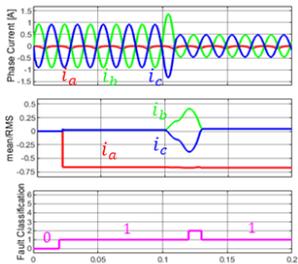


그림5 부하 R 10에서 20Ω 변화 시 전류 파형, mean/RMS 비와 고장 분류 결과 (S1 개방)

Fig.5 Current signal, mean/RMS ratio and fault classification result when load R changes from 10 to 20Ω (S1 Open)

3.3.2 고장 발생 시나리오

그림 6은 0.05s에 스위치를 고장 종류별로 개방하여 고장

발생 상황을 나타낸다. 각 고장 종류별로 파형이 변화하고 그에 따라 mean/RMS 비가 뚜렷하게 구분되고, 고장 클래스 결과도 표2의 순서와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

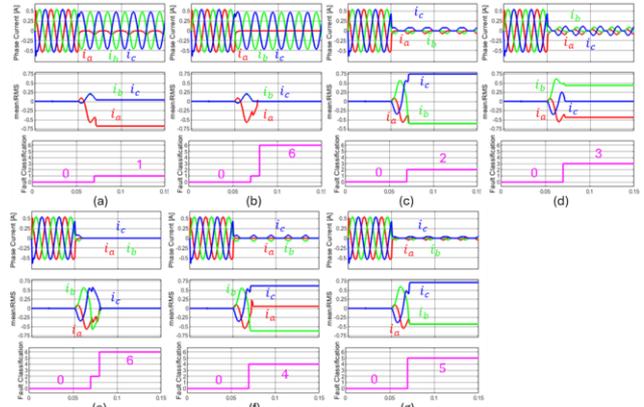


그림6 고장 발생 시 전류 파형, mean/RMS 비와 고장 분류 결과 (a) S1 (b) S1&2 (c) S1&3 (d) S1&4 (e) S1&3&5 (f) S1&2&3 (g) S1&3&6 개방 고장

Fig.6 Current signal, mean/RMS ratio and fault classification result when open fault occurs (a) S1 (b) S1&2 (c) S1&3 (d) S1&4 (e) S1&3&5 (f) S1&2&3 (g) S1&3&6 open fault

4. 결론

본 논문은 3상 인버터 회로에서 전류 mean/RMS 비를 활용하여 진단을 위한 회로 추가가 없고 연산량이나 메모리 소모량이 적은 알고리즘 기반 개방 고장 분류 방법을 제안하였다. 개방 고장으로 인한 전류 불균형에 따라 달라지는 mean/RMS 비에 대하여 상 별 값, 3상 비율 합, 절대 값 함으로 확장 이용하여 6개의 고장 클래스를 구분할 수 있다는 점에서 기존 기술과 차별된다. Mean/RMS 비의 값이 zero만으로 구성된 그룹2의 경우에는 mean/RMS 비 만으로는 double1과 triple1로 세부 분류될 수 없지만 향후 연구 진행을 통해 전류 불균형에 관한 추가 인자 고려하면 고장 세부 분류와 위치 진단까지 발전 가능할 것으로 예상된다. 구분 가능한 클래스의 경우, 부하 변화 및 고장 발생 상황에서도 변화에 상응한 분류 결과가 시뮬레이션을 통해 확인되었다. 실험을 통한 제안한 고장 분류 방법의 유효성 검증이 필요하며, 노이즈나 과도상태 반응 분석에 관한 연구로 확장하고자 한다.

참고 문헌

- [1] Y. Luo, L. Zhang, C. Chen, K. Li and K. Li, "Real-Time Diagnosis of Open Circuit Faults in Three-Phase Voltage Source Inverters," in IEEE Trans. Power Electron., vol. 39, no. 6, pp. 7572-7585, June 2024
- [2] C. N. Ibem, M. E. Farrag, A. A. Aboushady and S. M. Dabour, "Multiple Open Switch Fault Diagnosis of Three Phase Voltage Source Inverter Using Ensemble Bagged Tree Machine Learning Technique," IEEE in Access, vol. 11, pp. 85865-85877, 2023
- [3] Y. O. Ajra, H. A. Sheikh, N. Moubayed and G. Hoblos, "Fault Diagnosis of Open Switch Failure in Voltage Source Inverter Using Average and RMS Phase Voltages," 2021 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT), Zallaq, Bahrain, 2021