

# 듀얼 전동기를 구동하는 5-레그 인버터의 스위치 개방성 고장 진단 및 과전류 방지 제어 방법

이은우, 최동호, 이경구\*, 이준석  
 단국대학교, (주)인터모빌리티\*

## Open-Switch Fault Diagnosis and Overcurrent Prevention Control in Five-Leg Inverter Driving Dual Induction Motors

Eun-Woo Lee, Dongho Choi, Kyoung-gu Lee\*, June-Seok Lee  
 Dankook University, Inter Mobility\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 3상 듀얼 유도전동기를 구동하는 5-레그 인버터 (FLI)의 스위치 개방성 고장 진단 및 과전류 방지 제어 방법을 제안한다. FLI는 두 전동기에 공통으로 연결된 1개의 레그와 개별 4개의 레그로 구성된다. FLI에서 개방성 고장이 발생하는 경우 공통 레그의 전류가 다른 레그보다 최대 2배의 크기를 갖는 과전류가 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 정지 좌표계 전류 크기와 위상을 이용해 개방성 고장 진단 및 위치 검출 방법을 제안한다. 또한, 고장 발생 시 지령 전류를 정격 전류의 절반 이하로 제어함에 따라 공통 레그의 전류가 정격 전류를 초과하지 않도록 제어한다. 본 논문의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 1. 서론

5-레그 인버터(Five-Leg Inverter, FLI)는 듀얼 유도전동기를 구동하기 위한 토폴로지 중 하나이다. 그림 1과 같이 FLI는 2개의 유도전동기(IM<sub>1</sub>, IM<sub>2</sub>)와 2개의 스위치로 구성된 5개의 레그(A-leg, B-leg, C-leg, D-leg, E-leg)로 구성된다.<sup>[1]</sup> A-leg, B-leg, D-leg, E-leg는 각 전동기의 a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>상과 연결되고 C-leg는 두 전동기의 c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>상과 공통으로 연결된다. 총 10개의 스위치가 사용되는 FLI의 신뢰도를 높이기 위해 스위치에 대한 고장 진단이 필요하다.

인버터의 스위치에는 두 가지의 대표적인 고장이 있으며 단락성 고장과 개방성 고장으로 분류된다.<sup>[2,3]</sup> 단락성 고장은 과전류가 발생하여 인버터 과열과 전동기의 손상을 초래한다. 따라서 퓨즈와 같은 추가적인 하드웨어를 통해 매우 짧은 시간 내에 과전류를 차단한다. 반면 개방성 고장은 단락성 고장과 달리 인버터 작동이 가능하다. 그러나 전류 왜곡과 토크 리플 증가와 같은 시스템 성능을 저하시킨다. 특히 FLI에서는 공통 레그의 전류가 다른 레그의 전류보다 최대 2배까지 증가하는 과전류가 발생할 수 있다. 결과적으로 큰 전력 손실과 과열 및 인버터 손상을 초래할 수 있으므로 FLI의 개방성 고장에 대한 진단 및 과전류 방지 제어 방법이 요구된다.

본 논문에서는 정지 좌표계의 전류를 통한 FLI의 개방성 고장 진단 방법을 제안한다. 개방성 고장이 발생하면 고장 스위치에는 전류의 경로가 존재하지 않는다. 즉, 고장 위치의 정지 좌표계 전류 크기는 0이므로 전류 크기를 통해 고장

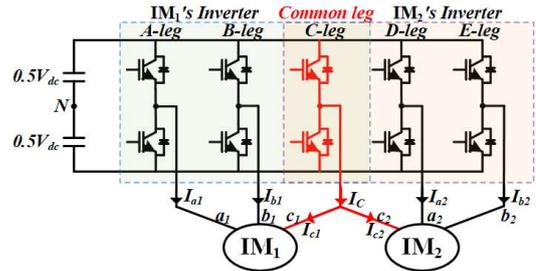


그림1 5-레그 인버터의 회로도.  
 Fig.1 Circuit of Five-Leg Inverter.

판단이 가능하다. 또한 전류 위상을 통해 고장 스위치의 위치를 검출할 수 있다. 과전류 방지 제어 방법으로는 고장 발생 시 지령 전류 크기를 정격 전류의 절반 이하로 조절하여 공통 레그의 전류가 정격 전류보다 커지는 것을 방지한다. 이후 개방성 고장이 발생한 전동기는 정지하고 나머지 전동기는 계속 구동한다. 제안하는 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 2. Five-Leg Inverter의 제어 기법

#### 2.1 Five-Leg Inverter의 변조 방법

C-leg에 c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>상이 함께 연결된 FLI의 구조적 특성에 의해 두 전동기를 독립적으로 구동하기 위한 변조 방법이 필요하다. 따라서 두 전동기를 독립적으로 구동하기 위해 c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>상의 지령 신호(V<sub>c1</sub>, V<sub>c2</sub>)를 다른 상의 지령 신호(V<sub>a1</sub>, V<sub>b1</sub>, V<sub>a2</sub>, V<sub>b2</sub>)에 주입하는 DZS(Double Zero Sequence) 방법을 사용한다.<sup>[1]</sup> 이때 5-레그 인버터의 지령 전압(V<sup>\*</sup><sub>A</sub>, V<sup>\*</sup><sub>B</sub>, V<sup>\*</sup><sub>C</sub>, V<sup>\*</sup><sub>D</sub>, V<sup>\*</sup><sub>E</sub>)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V^*_A &= V_{a1} + V_{c2}, & V^*_B &= V_{b1} + V_{c2}, & V^*_C &= V_{c1} + V_{c2}, \\ V^*_D &= V_{a2} + V_{c1}, & V^*_E &= V_{b2} + V_{c1}. \end{aligned} \quad (1)$$

#### 2.2 Five-Leg Inverter의 최소 전류 제어 방법

C-leg의 최대 전류 크기(I<sub>C,peak</sub>)는 c<sub>1</sub>상의 전류(I<sub>c1</sub>)와 c<sub>2</sub>상의 전류(I<sub>c2</sub>) 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$I_{C,peak} = \sqrt{I^2_{c1} + I^2_{c2} + I_{c1}I_{c2}\cos(\delta)}, \quad (2)$$

여기서 δ는 I<sub>c1</sub>과 I<sub>c2</sub>의 위상차를 의미한다. δ가 0°인 경우 I<sub>C</sub>는 다른 레그의 전류보다 최대 2배의 크기이며 δ가 180°인 경우 최소가 된다. 따라서 두 전동기의 속도(RPM<sub>1</sub>, RPM<sub>2</sub>)와 토크(T<sub>M1</sub>, T<sub>M2</sub>)가 같을 때 δ를 180°로 제어하기 위해 위상 제어기를 사용한다. 위상 제어기에 의한 속도 오차는 슬립

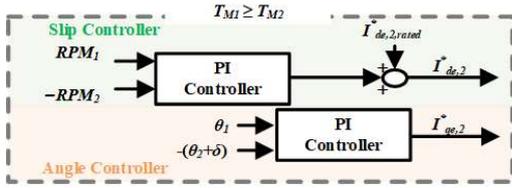


그림2 위상 제어기와 슬립 제어기의 블록도.  
Fig.2 Block diagrams of angle controller and slip controller.

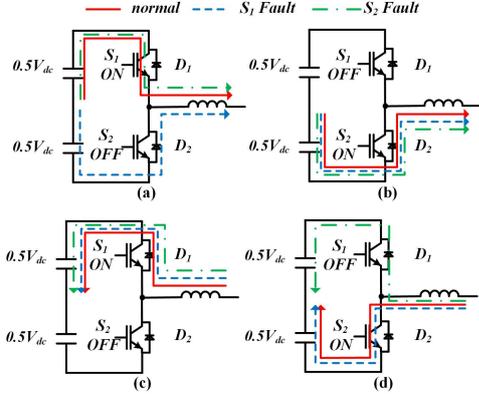


그림3 개방성 고장 발생 시 전류 경로 (a)  $I > 0, S_1:ON, S_2:OFF$ ,  
(b)  $I > 0, S_1:OFF, S_2:ON$ , (c)  $I < 0, S_1:ON, S_2:OFF$ , (d)  $I < 0, S_1:OFF, S_2:ON$ .  
Fig.3 Current path when open-switch occurs (a)  $I > 0, S_1:ON, S_2:OFF$ ,  
(b)  $I > 0, S_1:OFF, S_2:ON$ , (c)  $I < 0, S_1:ON, S_2:OFF$ , (d)  $I < 0, S_1:OFF, S_2:ON$ .

제어기를 통해 보상한다.<sup>[1]</sup> 위상 제어기와 슬립 제어기의 블록도는 그림 2와 같다. 여기서  $I_{de,2}^*$ 와  $I_{qe,2}^*$ 는 IM<sub>2</sub>의 동기 좌표계 d-q축 지령 전류,  $I_{de,2,rated}$ 는 IM<sub>2</sub>의 d축 정격 전류를 의미한다.

### 3. 개방성 고장 진단 및 과전류 방지 제어 방법

그림 3은 레그의 스위치 고장 위치에 따른 전류 경로이다. 상단 스위치( $S_1$ )에서 개방성 고장이 발생한 경우 음의 전류는 상단 역병렬 다이오드( $D_1$ )와 하단 스위치( $S_2$ )를 통해 흐르지만 양의 전류는  $S_1$ 으로 흐르지 못하고 하단 역병렬 다이오드( $D_2$ )를 통해서만 흐른다. 반대로  $S_2$ 에서 개방성 고장이 발생한 경우 양의 전류는  $S_1$ 과  $D_2$ 를 통해 흐르지만 음의 전류는  $S_2$ 로는 흐르지 못하고  $D_1$ 을 통해서만 흐른다. 따라서, 정상 동작과 다른 출력 전압이 출력되므로 고정자 전류( $I_{s,n}, n=1,2$ )가 감소하며 이를 통해 고장 판단이 가능하다. 여기서  $n$ 은 유도전동기의 번호를 의미한다.

고장 판단을 위해 정지 좌표계 d-q축 전류( $I_{ds,n}, I_{qs,n}, n=1,2$ )를 사용하며,  $I_{ds,n}$ 와  $I_{qs,n}$ 는 다음과 같다.

$$I_{ds,n} = \frac{2}{3}I_{an} - \frac{1}{3}I_{bn} - \frac{1}{3}I_{cn}, I_{qs,n} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{bn} - I_{cn}), (n=1,2), (3)$$

여기서  $I_{an}$ 은 각 전동기의 a상 전류,  $I_{bn}$ 은 b상 전류,  $I_{cn}$ 은 c상 전류를 의미한다. 고장이 발생한 경우 고정자 지령 전류( $I_{s,n}^*, n=1,2$ )보다  $I_{s,n}$ 이 감소하므로 다음과 같은 경우 고장으로 판단한다.

$$I_{s,n} (= \sqrt{I_{ds,n}^2 + I_{qs,n}^2}) < k \cdot I_{s,n}^* (= \sqrt{I_{ds,n}^{*2} + I_{qs,n}^{*2}}), (4) (n=1,2).$$

여기서  $k$ 는 0부터 1까지의 크기를 갖는 고장 판단 계수,  $I_{ds,n}^*$ ,  $I_{qs,n}^*$ 은 정지 좌표계 d-q축 지령 전류를 의미한다.  $k$ 는 하드웨어 성능이나 어플리케이션에 따라 크기가 결정된다.

그림 4는 A-leg 상단 스위치가 고장난 경우  $I_{al}, I_{bl}, I_{cl}$ 과  $I_{sl}$ ,

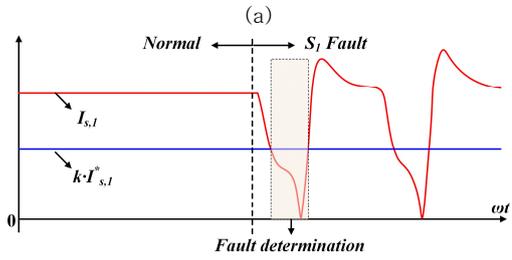
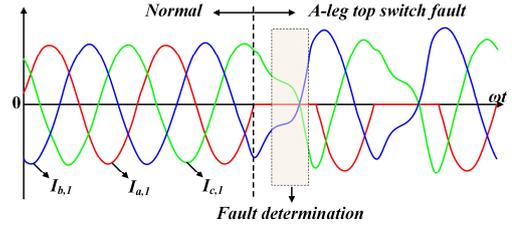


그림4 A-leg 상단 스위치 고장에 따른 파형 (a)  $I_{al}, I_{bl}, I_{cl}$ , (b)  $I_{s1}, I_{s1}^*$ .  
Fig.4 Waveforms when A-leg top switch fault (a)  $I_{al}, I_{bl}, I_{cl}$ , (b)  $I_{s1}, I_{s1}^*$ .

표 1 전류 위상에 따른 고장 스위치 위치.

Table 1 Location of open-switch depending on current angle.

Number	$\theta_n$ [°]	Location	Number	$\theta_n$ [°]	Location
1	330~30	Top of A-phase	4	270~330	Bottom of B-phase
2	150~210	Bottom of A-phase	5	210~270	Top of C-phase
3	90~150	Top of B-phase	6	30~90	Bottom of C-phase

$I_{s1}^*$ 을 나타낸다. 그림 4(a)와 같이 A-leg 상단 스위치가 고장난 경우 양의 전류 경로가 존재하지 않아  $I_{al}$ 의 크기는 0이다. 따라서 그림 4(b)와 같이  $I_{s1}$ 이 감소하고  $k \cdot I_{s1}^*$ 보다 작은 경우 고장으로 판단한다.

고장 스위치의 위치는  $I_{s,n}$ 의 위상( $\theta_n, n=1,2$ )과  $I_{an}, I_{bn}, I_{cn}$ 의 크기를 통해 검출할 수 있다.  $\theta_n$ 은  $I_{ds,n}^*, I_{qs,n}^*$ 을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_n = \tan^{-1}(I_{qs,n}^* / I_{ds,n}^*), (n=1,2). (5)$$

$\theta_n$ 에 따른 고장 스위치의 위치는 표 1과 같으며,  $\theta_n$ 에 해당되는  $I_{an}, I_{bn}, I_{cn}$ 이 0인 경우 고장 위치를 검출한다. 예를 들어  $\theta_n$ 이 330°과 30°사이에서의  $I_{al}$ 의 크기가 0인 경우 A-leg 상단 스위치 고장으로 검출할 수 있다. 고장난 스위치의 위치에 따라 고장 플래그( $f_{E,n}, n=1,2$ )가 1로 래치된다. 즉, IM<sub>1</sub> 축의 스위치가 고장난 경우  $f_{E1}$ 이 1로 래치되고 IM<sub>2</sub> 축의 스위치가 고장난 경우  $f_{E2}$ 가 1로 래치된다.

FLI에서의 개방성 고장은 시스템의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라  $I_c$ 의 크기를 다른 전류보다 최대 2배까지 커지는 과전류가 발생할 수 있다. 이는 하드웨어와 전동기에 손상을 초래할 수 있다. 따라서  $I_c$ 의 크기를 정격 고정자 전류( $I_{s,n,rated}, n=1,2$ )보다 절반 이하가 되도록 제한하는 방법을 제안한다. 동기 좌표계 d축 지령 전류( $I_{de,n}^*, n=1,2$ )를 통해 동기 좌표계 q축 지령 전류( $I_{qe,n}^*, n=1,2$ ) 크기를 제한하며 q축 전류 제한 값( $I_{qe,n,lim}, n=1,2$ )은 다음과 같다.

$$I_{qe,n,lim} = 0.5 \sqrt{(I_{s,n,rated})^2 - (I_{de,n}^*)^2}, (n=1,2). (6)$$

그림 5는 FLI의 개방성 고장 진단 및 과전류 방지 제어 방법의 제어 블록도이다.  $I_{ds,n}$ 과  $I_{qs,n}$ 은 3상 전류로부터 계산되어 식 (4)와 같이 고장 판단할 때 사용된다. 고장

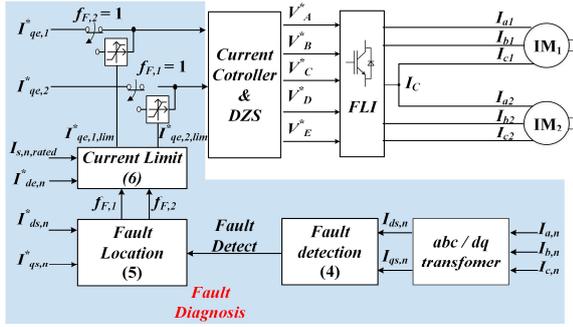


그림5 고장 진단 및 과전류 방지 제어 방법의 블록도.  
Fig.5 Block diagram of fault diagnosis and overcurrent prevent control.

표 2 유도전동기의 시뮬레이션 파라미터.

Table 1 Simulation parameters of induction motor.

Stator resistance	0.8035 Ω	Stator inductance	226.89 mH	Rated current	10.8 A
Rotor resistance	0.7513 Ω	Rotor inductance	226.89 mH	Rated speed	3550 rpm
Power	3.7 kW	Mutual inductance	203.24 mH	Rated torque	10.2 Nm
Pole	2	DC-Link Voltage	600 V	Switching frequency	10kHz

판단이 된 경우 식 (5)와 표 1을 통해 고장 위치를 검출한다. 이후 고장이 발생하지 않은 전동기의  $I_{qe,n}^*$ 의 크기를 식 (6)으로 제한한다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

제안하는 FLI의 개방성 고장 진단 및 과전류 방지 제어 방법은 표 2의 시뮬레이션 파라미터와 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 회로는 그림 1과 같으며,  $RPM_1$ 과  $RPM_2$ 는 1750rpm으로 제어하였다. 부하 토크( $T_{L1}$ ,  $T_{L2}$ )는 팬 또는 펌프와 같이 속도 제곱에 비례하는 부하를 사용하였다. 또한  $k$ 는 0.5로 진행하였다.

그림 6은  $A$ -leg 상단 스위치에 개방성 고장이 발생한 경우 시뮬레이션 결과를 나타낸다.  $I_{a1}$ ,  $I_{b1}$ ,  $I_{c1}$  중  $I_{a1}$ 에 양의 전류가 발생하지 않아  $I_{s,1}$ 이 감소하는 것을 확인할 수 있다.  $I_{s,1}$ 의 크기가  $k \cdot I_{s,1}^*$ 보다 작은 경우 고장으로 판단하고 고장 위치 검출을 진행한다.  $\theta_1$ 에 해당하는 전류의 크기가 0이므로 표 1을 통해 고장 위치를 검출할 수 있다.  $A$ -leg 상단 스위치 고장으로 검출하였으므로  $f_{F,1}$ 은 1로 래치된다.

그림 7은 고장 검출 후 과전류 방지 제어 방법의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 2초에서  $A$ -leg 상단 스위치가 고장난 경우  $I_C$ 의 크기를 제한하기 위해  $I_{qe,2}^*$ 는  $I_{qe,2,rated}^*$ 의 절반으로 제한된다. 이때  $I_{qe,1}^*$ 은 0으로 제어됨으로써  $IM_1$ 의 속도가 0으로 감속한다.  $IM_1$ 의 구동이 정지한 후  $IM_2$ 만 구동하는 모습을 확인할 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문은 듀얼 유도전동기를 구동하는 FLI의 개방성 고장 진단 및 과전류 방지 제어 방법을 제안하였다. 제안하는 기법은 개방성 고장에 따른 전류 경로를 분석하고 정지 좌표계 d-q축 전류의 크기와 위상을 통해 고장 판단과 위치를 검출한다. 또한 공통 레그에 흐르는 전류의 크기가 정격 전류를 초과하지 않도록 지령 전류를 제한한다.

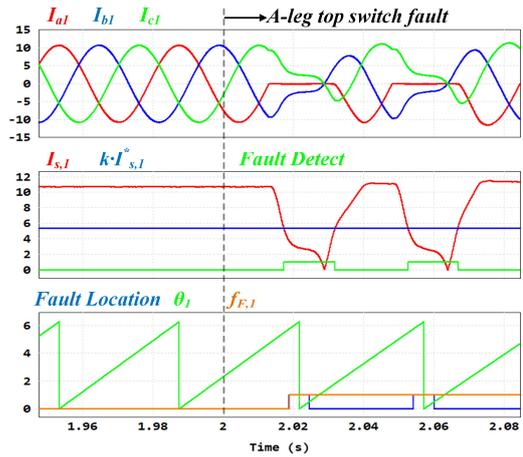


그림6  $A$ -leg 상단 스위치 고장 시 고장 진단 시뮬레이션 결과 파형  
Fig.6 Simulation results of fault diagnosis when top of  $A$ -leg is faulty.

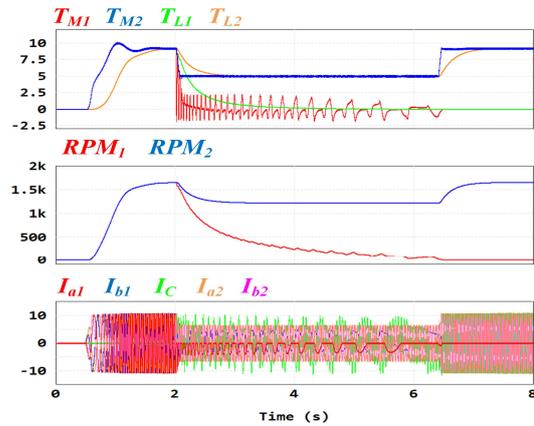


그림7  $A$ -leg 상단 스위치 고장 시 과전류 방지 제어 시뮬레이션 결과 파형  
Fig.7 Simulation results of overcurrent prevent control when top of  $A$ -leg is faulty.

제안하는 개방성 고장 진단 및 과전류 방지 제어의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원과 산업통상자원부/한국산업기술진흥원 (KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 RS-2022-00144203 / P0017120, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

#### 참고 문헌

- [1] Y. -S. Lim, J. -S. Lee and K. -B. Lee, "Advanced Speed Control for a Five-Leg Inverter Driving a Dual-Induction Motor System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 1, pp. 707-716, Jan. 2019.
- [2] R. R. Errabelli and P. Mutschler, "Fault-Tolerant Voltage Source Inverter for Permanent Magnet Drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 500-508, Feb. 2012.
- [3] Z. Zhang, Y. Hu, G. Luo, C. Gong, X. Liu and S. Chen, "An Embedded Fault-Tolerant Control Method for Single Open-Switch Faults in Standard PMSM Drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 7, pp. 8476-8487, July 2022.