

추진시스템의 5-레그 인버터 적용가능성 분석

Applicability analysis of five-leg inverter for propulsion system

임영설*, 신덕호**, 이준석[†], 이교범*

Young-Seol Lim*, Duck-Ho Shin**, June-Seok Lee[†], Kyo-Beum Lee*

Abstract This paper analyzes applicability of five-leg inverter for the train propulsion system. First, five-leg inverter's IGBT module is applied by considering the operation conditions of subway train. Through the results, loss analysis is implemented. Next, When reflecting the result of five-leg inverter's loss analysis in thermal design of existing subway train, it confirms that five-leg inverter's temperature distribution is lower than three-leg inverter's temperature distribution and suggests the applicability of five-leg inverter. Also, When five-leg inverter's reliability analysis is compared with three-leg inverter's reliability analysis, the result of analysis verifies improvement in terms of reliability.

Keywords : Five-leg inverter, Propulsion system, Loss analysis, Thermal design, Reliability analysis

초 록 본 논문에서는 철도차량의 추진시스템을 위한 5-레그 인버터의 적용가능성을 분석한다. 먼저 도시철도차량의 동작 조건을 고려하여 5-레그 인버터의 IGBT 소자를 선정하고 이를 바탕으로 손실분석을 진행한다. 5-레그 인버터의 손실분석결과를 기존 도시철도차량의 방열설계에 반영하여 3-레그 인버터의 온도분포보다 낮은 온도분포 결과를 확인하고 이를 바탕으로 5-레그 인버터의 적용가능성을 제시한다. 또한, 5-레그 인버터 추진시스템의 신뢰도 분석을 3-레그 인버터 추진시스템과 비교하여 신뢰도 측면에서 향상됨을 확인한다.

주요어 : 5-레그 인버터, 추진시스템, 손실분석, 방열설계, 신뢰도 분석

1. 서 론

최근 철도산업의 경쟁력 확보를 위해서 주요장치들의 경량화/소형화에 대한 관심이 증대되고 있으며, 특히 인버터의 경량화/소형화와 추진시스템의 효율을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 5-레그 인버터(FLI, Five-leg Inverter)는 5개의 레그로 구성되며, 1개의 제어기를 통해 2대의 전동기를 독립적으로 제어할 수 있다. 본 논문에서는 FLI의 손실분석, 방열 설계에 따른 온도분포, 신뢰도 분석을 통해 기존 시스템인 3-레그 인버터(TLI, Three-Leg Inverter)와 비교하여 FLI의 추진시스템 적용 가능성을 분석한다.

[†] 교신저자: 한국철도기술연구원 철도안전인증연구소(ljs@krri.re.kr)

* 아주대학교 정보통신대학 전자공학부

** 한국철도기술연구원 철도안전인증연구소

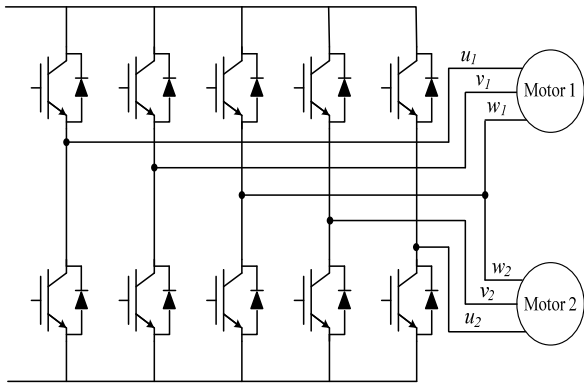


Fig. 1. Topology of FLI with two-traction motors(1C2M)

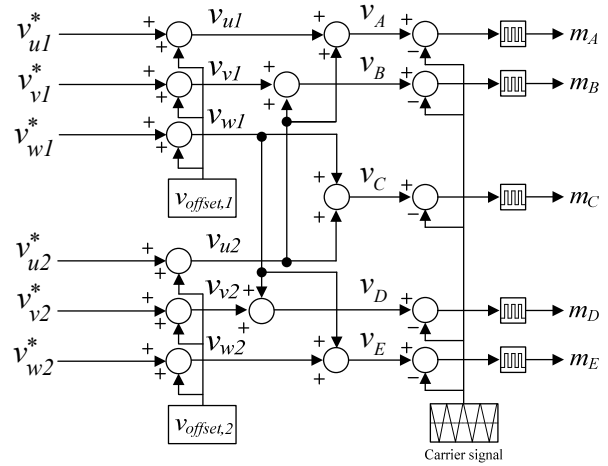


Fig. 2. Block diagram of PWM using carriers

2. Five-leg Inverter의 기본 동작 분석

2.1 기본 토폴로지 및 동작 원리

2.1.1 기본 토폴로지

FLI의 1C2M(1 Control 2 Motors)기본 토폴로지는 Fig. 1과 같으며, 5개의 레그로 구성된다. 5개의 레그 중 하나의 레그는 2대의 전동기와 모두 연결되어 있으며, 2대의 전동기를 독립적으로 제어할 수 있다 [1-3].

2.1.2 동작 원리

FLI는 Fig. 2와 같은 제어 블록도를 통해 제어되며, 최종적으로 각 레그를 위한 변조신호 (v_A, v_B, v_C, v_D, v_E)와 반송파의 비교를 통해 출력전압(m_A, m_B, m_C, m_D, m_E)이 생성되고 2대의 전동기를 독립적으로 제어할 수 있다 [1-3].

3. 추진시스템의 Five-leg Inverter 적용 가능성 분석

3.1 Five-leg Inverter와 기존시스템과의 비교

3.1.1 손실분석

손실분석은 TLI를 이용한 1C4M(1 Car 4 Motors) 구조와 FLI를 이용한 1C4M 구조를 비교하였으며, 각 시스템의 토폴로지는 Fig. 3, Fig. 4와 같다. TLI에 사용된 IGBT는 현재 도시철도차량에서 주로 사용되는 3300V/1200A급 Infineon 사의 FZ1200R33KFC를 사용하였고, FLI에서는 TLI와 비교하여 스위치에 흐르는 전류의 감소가 가능하기 때문에 3300V/800A급 Infineon 사의 FZ800RKFC2C로 선정하였다. 손실분석 시뮬레이션은 Table. 1의 조건에서 전동기의 부하토크는 $500\text{N}\cdot\text{m}$, 관성모멘트는 $15\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 으로 설정하였으며, PSIM을 이용하여 수행하였다.

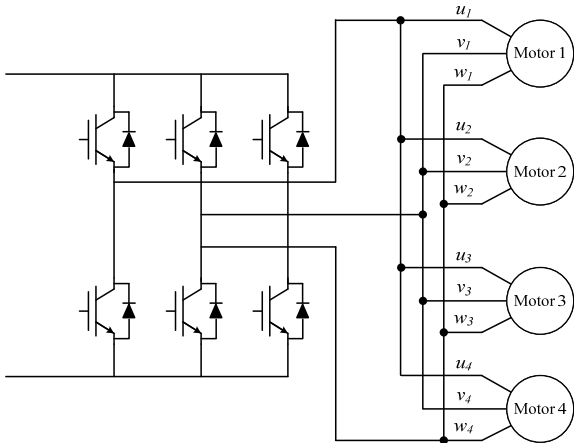


Fig. 3. Topology of TLI with four-traction motors(1C4M)

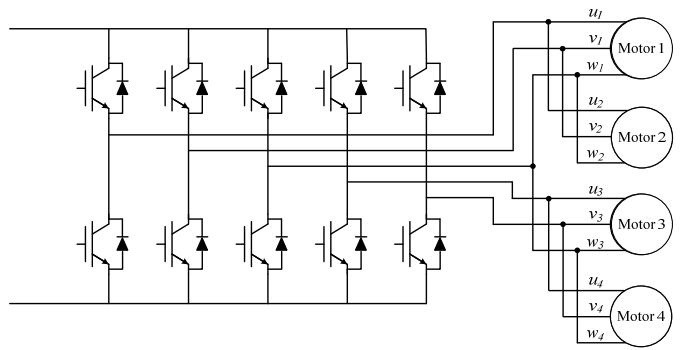


Fig. 4. Topology of FLI with four-traction motors(1C4M)

Table 1. Simulation parameters of induction motor

DC-Link Voltage	1500[V]	Switching Frequency	1600[Hz]
Motor Rate Voltage	1100[Vrms]	Motor Rate Frequency	75[Hz]
Motor Rate Speed	1950[rpm]	Motor Rate Current	136[Arms]

각 인버터의 손실분석 시 IGBT의 스위칭손실과 도통손실, Diode의 스위칭손실과 도통손실이 고려되었으며, 동작조건은 벡터제어를 수행하는 일정토크영역(1000rpm)으로 선정하였다. 또한 FLI는 연결된 두 전동기 그룹의 위상각(φ)에 따라 공통으로 사용되는 레그의 전류가 변화하기 때문에 FLI 손실분석 시에는 3가지의 위상각 조건을 고려하여 효율분석을 진행하였다 [4].

손실분석 결과는 Table. 2와 같으며 TLI와 비교하여 FLI가 더 적은 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 FLI를 활용할 경우 방열설계 요구사항이 감소될 수 있어 경량화와 소형화가 가능할 것으로 판단된다.

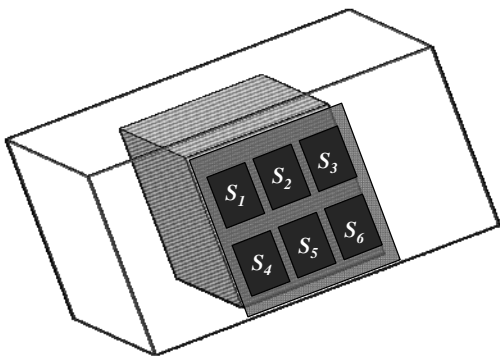


Fig. 5. Thermal design by applying TLI(1C4M)

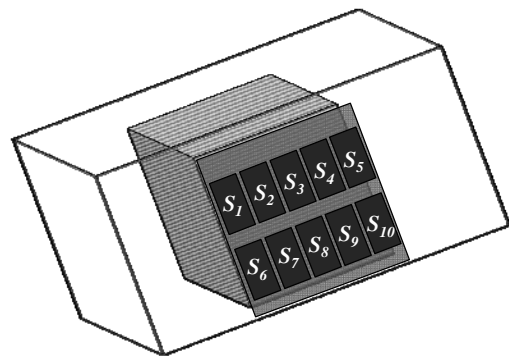


Fig. 6. Thermal design by applying FLI(1C4M)

Table 2. Loss analysis of TLI and FLI

	TLI	FLI($\phi=0^\circ$)	FLI($\phi=120^\circ$)	FLI($\phi=150^\circ$)
Switch Loss	1582.2[W]	697.6[W]	803[W]	871.6[W]
Diode Loss	590.2[W]	376.7[W]	312[W]	287.7[W]
Switch Loss(C-leg)	-	1270[W]	578.1[W]	380.1[W]
Diode Loss(C-leg)	-	286.5[W]	168.3[W]	74.4[W]
Loss of one IGBT	2172.4[W]	1074.3[W]	1115[W]	1159.3[W]
Lose of one IGBT(C-leg)	-	1556.5[W]	746.4[W]	454.5[W]
Total Loss	13034.4[W]	11707.4[W]	10412.8[W]	10183.4[W]
Input power of Inverter	443042[W]	440186[W]	440649[W]	440967[W]
Efficiency	97.06%	97.34%	97.64%	97.69%

Table 3. Temperature distribution of TLI

	T_{S1}	T_{S2}	T_{S3}	T_{S4}	T_{S5}	T_{S6}
Temperature of Switch	97.6°C	93.6°C	85.2°C	93.6°C	89.7°C	81.8°C
Δ Temperature	57.6°C	53.6°C	45.2°C	53.6°C	49.7°C	41.8°C

Table 4. Temperature distribution of FLI when $\phi=120^\circ$

	T_{S1}	T_{S2}	T_{S3}	T_{S4}	T_{S5}	T_{S6}	T_{S7}	T_{S8}	T_{S9}	T_{S10}
Temperature of Switch	78.6°C	78.5°C	75.9°C	72.7°C	67.9°C	75.6°C	75.3°C	72.9°C	70.0°C	65.8°C
Δ Temperature	38.6°C	38.5°C	35.9°C	32.7°C	27.9°C	35.6°C	35.3°C	32.9°C	30.0°C	25.8°C

2.2.2 방열설계의 적용 및 온도분포 분석

방열설계 시 온도분포를 분석하기 위해 기존 TLI를 이용한 1C4M의 히트파이프가 FLI를 이용한 1C4M 구조에 적용되었다. Fig. 5는 기존 시스템에 적용중인 TLI의 방열설계 모델을 나타내며, Fig. 6은 기존 시스템에 FLI를 적용한 방열설계 모델을 나타낸다. TLI와 FLI에 사용된 IGBT는 손실분석에서 사용된 스위치와 동일하며, FLI에 사용되는 IGBT 소자(FZ1200R33KFC)는 TLI에 사용되는 IGBT 소자(FZ1200R33KFC)에 비해 가로길이가 3/2만큼 작기 때문에 기존 시스템의 히트파이프에 부착이 가능함을 확인할 수 있다.

온도분포분석은 손실분석 시의 조건과 동일한 조건에서 진행되었으며, 자연냉각 조건으로 우측에서 좌측으로 3m/s의 통풍을 적용하였다. 또한 FLI에 연결된 두 전동기 그룹의 위상각은 120도로 설정하였으며, 그에 따른 TLI와 FLI에서 각 스위치의 온도분포분석 결과는 Table. 3, Table. 4와 같다. 온도분포분석을 통해 TLI의 최고 온도는 97.76°C이며, FLI의 최고 온도는 78.65°C임을 확인할 수 있다. 따라서 FLI의 최고 온도가 TLI에 비해 낮음에 따라 기존 시스템과 비교 시 히트파이프의 경량화/소형화가 가능할 것으로 판단된다.

2.2.3 신뢰도 분석

인버터의 신뢰도 분석을 위해서는 인버터를 구성하는 전력변환장치 이외에도 제어기의 고장률을 고려해야 정확한 신뢰도 분석이 가능하지만, 본 논문에서는 TLI와 FLI가 동일한 제어기를 사용한다고 가정하고 전력변환부의 차이만을 고려하여 두 인버터의 고장률을 비교하였다. 한 레그의 고장률(λ_L)은 IGBT와 게이트드라이버를 고려하여 게이트드라이버의 고장률(λ_G)과 IGBT 모듈의 고장률(λ_M)의 합의 2배로 표현할 수 있으며 식(1)과 같다.

$$\lambda_L = 2(\lambda_G + \lambda_M) \quad (1)$$

TLI는 3개의 레그 중 하나의 레그에 고장 발생 시, 인버터의 동작이 불가능하기 때문에 TLI의 고장률은 각 레그의 고장률의 합($3\lambda_L$)과 같다. 이러한 TLI의 고장률을 바탕으로 Markov 모델을 통해 신뢰도를 계산할 수 있으며, 각 레그의 상태를 1(정상), 0(고장)으로 정의하고 Markov 모델로 표현하면, TLI의 신뢰도는 Fig. 7과 같다. 이 때 전체 시스템의 고장률로부터, 시스템의 신뢰도는 지수분포로 나타나며, 그에 따른 TLI의 신뢰도는 식(2)와 같다.

$$R_{TLI} = e^{-3\lambda_L t} \quad (2)$$

FLI는 전동기 2대에 공통으로 사용되는 레그(C 레그)를 제외한 나머지 레그의 고장은 전체 인버터의 동작불가로 이어지지 않으며 하나의 전동기를 이용하여 결합허용동작이 가능하다. 따라서 이러한 특징을 고려하여 신뢰도 분석을 진행한다. 즉, C 레그의 고장은 전체 인버터의 고장으로 고려하며, 나머지 레그의 고장은 결합허용동작으로 전환되고 이때는 고장이 발생한 레그가 포함되지 않은 전동기만이 구동된다. 결합허용동작 전환 후에는 TLI와 동일하게 분석될 수 있다. 따라서 Markov 모델을 통해 FLI의 신뢰도는 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있으며, 그에 따른 FLI의 신뢰도는 식(3)과 같다.

$$R_{FLI} = \frac{4}{5}(4e^{-3\lambda_L t} - 3te^{-4\lambda_L t}) + \frac{1}{5}e^{-\lambda_L t} \quad (3)$$

위의 결과를 바탕으로 FLI와 TLI의 신뢰도 함수를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같으며, 이를 통해 FLI의 신뢰도함수가 TLI보다 높은 것을 확인할 수 있다.

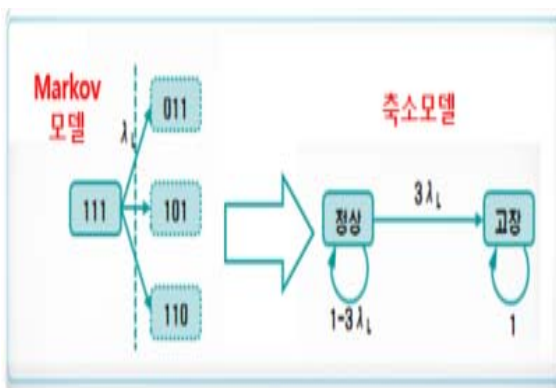


Fig. 7. Reliability analysis of TLI

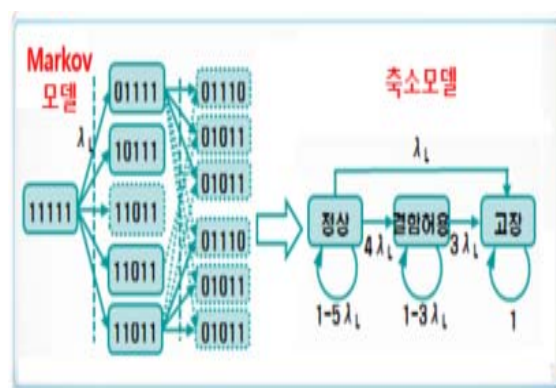


Fig. 8. Reliability analysis of FLI

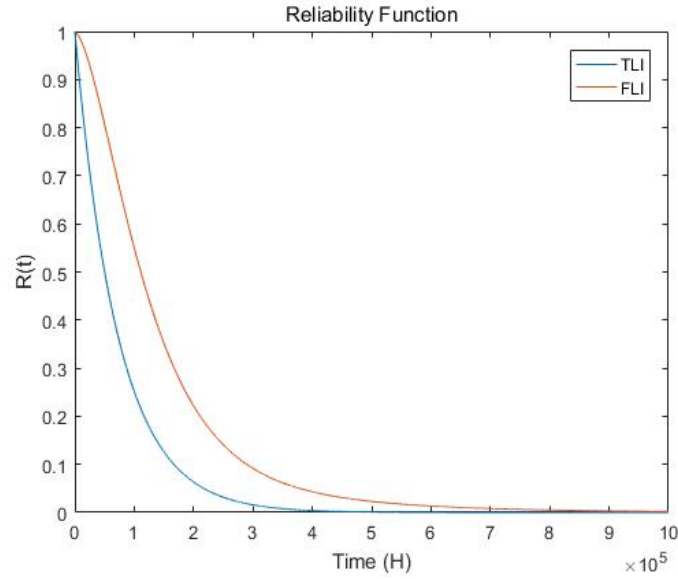


Fig. 9. Reliability function of TLI and FLI when $\lambda_L=4.6e^{-6}$

3. 결론

본 논문에서는 FLI의 기본 동작조건을 분석하고, 기존 시스템인 TLI와의 손실과 방열설계 시 온도분포 비교를 통해 경량화/소형화의 가능성을 확인하였다. 또한 고장률을 바탕으로 신뢰도 분석을 수행한 결과 FLI이 TLI보다 더 높은 신뢰도를 보이는 것으로 확인되었다. FLI를 이용한 추진시스템은 고속영역에서 출력 가능한 토크가 감소하는 단점이 있으나, 저속에서 동작하는 철도차량의 경우 TLI과 비교하여 경량화/소형화가 가능하고 더 높은 신뢰도를 보임에 따라 기존 추진시스템의 대체수단으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Jones, M., Vukosavic, S. N., Dujic, D., Levi, E., & Wright, P. (2008) Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant power applications, *IET Electric Power Applications*, 2(5), pp. 275-287.
- [2] Talib, N., Ibrahim, Z., Rahim, N., & Hasim, A. (2013) Characteristic of induction motor drives fed by three leg and five leg inverters, *Journal of Power Electronics*, 13(5), pp. 806-813.
- [3] Delarue, P., Bouscayrol, A., & Francois, B. (2003) Control implementation of a five-leg voltage-source-inverter supplying two three-phase induction machines. *In Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International, Madison*, pp. 1909-1915
- [4] Y.S. Lim, D.H. Shin, J.S. Lee, & K. B. Lee. (2017) Performance analysis of a five-leg inverter for the train propulsion system. *Journal of the Korean Society for Railway*, 20(1), pp. 43-54.