

유도가열시스템의 구성부품에 대한 강건설계

김두현* · 김성철**† · 이종호*** · 강문수**** · 정천기****

Robust Design for Parts of Induction Bolt Heating System

Doo Hyun Kim* · Sung Chul Kim**† · Jong Ho Lee*** · Moon Soo Kang**** · Cheon Kee Jeong****

†Corresponding Author

Sung Chul Kim

Tel : +82-43-223-3650

E-mail : ksc3650@naver.com

Received : February 17, 2021

Revised : March 3, 2021

Accepted : March 26, 2021

Abstract : This paper presents the robust design of each component used in the development of an induction bolt heating system for dismantling the high-temperature high-pressure casing heating bolts of turbines in power plants. The induction bolt heating system comprises seven assemblies, namely AC breaker, AC filter, inverter, transformer, work coil, cable, and CT/PT. For each of these assemblies, the various failure modes are identified by the failure mode and effects analysis (FMEA) method, and the causes and effects of these failure modes are presented. In addition, the risk priority numbers are deduced for the individual parts. To ensure robust design, the insulated-gate bipolar transistor (IGBT), switched-mode power supply (SMPS), C/T (adjusting current), capacitor, and coupling are selected. The IGBT is changed to a field-effect transistor (FET) to enhance the voltage applied to the induction heating system, and a dual-safety device is added to the SMPS. For C/T (adjusting current), the turns ratio is adjusted to ensure an appropriate amount of induced current. The capacitor is replaced by a product with heat resistance and durability; further, coupling with a water-resistant structure is improved such that the connecting parts are not easily destroyed. The ground connection is chosen for management priority.

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : FMEA(failure modes and effects analysis), RPN(risk priority number), induction bolt heating system, robust design

1. 서론

유도가열시스템은 발전소 터빈의 고온고압의 케이싱 볼트를 해체할 때 사용되는 도구를 말한다. 국내의 유도가열시스템은 대부분 저항 가열 방식을 이용하고 있다. 저항 가열방식은 케이싱 볼트에만 영향을 주는 것이 아니라 전도성을 가진 재질 전반에 영향을 주어 구조물의 변형을 초래하고 있다. 또한 안전상의 문제로 가열에서 발생한 열로 인하여 인명사고도 발생되고 있다. 따라서 케이싱 볼트에만 가열할 수 있고 다른 재질에 영향을 주지 않는 방법을 선택해야 한다¹⁾. 이런 이유에서 케이싱 볼트에만 열을 가하는 유도 방식의 유도가열시스템을 선택한다. 이런 유도가열시스템은

일본과 미국에서 주도하고 있다. 일본의 경우는 케이싱 볼트에만 에너지를 가하는 유도가열시스템을 개발하여 보급한 상태이며 미국의 경우도 가스뿐만 아니라 유도히터를 추가적으로 접목한 제품들이 출시되고 있는 실정이다²⁾. 국내의 기술은 아직 도입단계이며 일본 및 미국의 기술을 그대로 도입하기에는 현실적으로 어렵다. 그러나 현장의 기술을 유지하며 국외 기술에 근접할 수 있는 방법은 여러 가지가 있다. 유도가열시스템은 교류를 직류로 변환하는 인버터 기술이 중요한데 이 인버터 기술은 일본 및 미국과 대등하며 나머지 구성부품에 대하여는 이 인버터와 연계되어 안정적으로 운용만 된다면 가능하다. 추가적으로 개발단계의 유도가열시스템에 있어서는 성능시험도 중요하지만 보다

*충북대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

**충북대학교 안전공학과 초빙교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

***원광대학교 소방행정학과 교수 (Department of Fire Service Administration, Wonkwang University)

****디아이케이(주) 이사 (DIK CO., LTD.)

중요한 것은 구성부품에 대한 관리우선순위 파악과 대체 부품에 대한 강건설계가 이루어져야만 현장 적용에 있어서 효과적인 신뢰성을 확보할 수 있다^{3,4)}.

이에 본 연구에서는 AC 브레이크, AC 필터, 인버터, 트랜스포머, 워크 코일, 케이블 및 CT/PT로 7개의 어셈블리와 22개의 부품을 이용하여 유도가열시스템을 개발하였다. 개발된 제품에 대하여 각각의 고장모드를 발굴하고 고장모드에 대한 원인과 영향을 부품마다 제시하였다. 구성부품 개개에 대한 고장우선순위를 발굴하기 위하여 FMEA 기법을 이용하였다. FMEA를 통하여 총 22개의 부품에 대하여 위험우선순위를 도출하였고 강건설계가 필요한 부품을 제시하였다.

2. 유도가열시스템의 개요

2.1 유도가열 시스템의 회로도

유도가열기 시스템은 3상교류 전원을 입력 받아 유도가열을 위한 전류변환 부분과 팬(Fan), 디스플레이, 각종 전자보드의 통신 및 전원을 위한 전원공급 부분으로 2가지로 크게 나눈다.

전류변환 부분의 첫 입력단인 MCCB는 과전류로부터 전체적인 유도가열시스템을 보호한다. Line Filter는 AC에서 입력되는 노이즈를 제거하고 STACK에 전달한다. STACK은 인버터, 트랜스포머(M/T), 커패시터로 구성되어 있다. 커패시터는 고전류에서 발생하는 열손실과 역률개선폰이며, MC를 통하여 조절이 가능한 구조이다. 최종 출력단의 워크 코일(Work coil)에서 유도가열이 형성된다.

전원공급 부분은 Fuse, CB, SMPS, 팬, Display(HMI), Sensing board, DSP board로 구성되어 있다. Fuse와 CB는 과전류로부터 기기를 보호하는 장치이다. SMPS는 팬, Display(HMI)와 Sensor Board는 각각의 전자 장치에 전원을 공급한다.

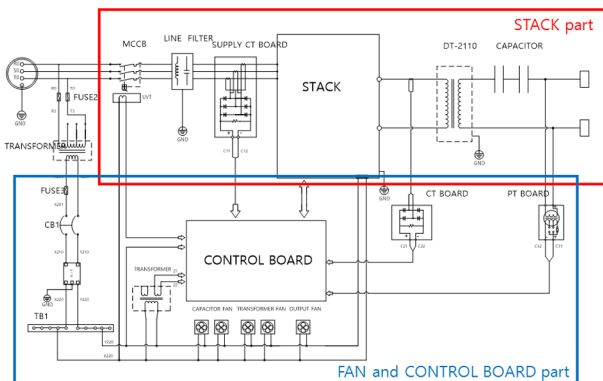


Fig. 1. Circuit diagram of IBHS.

Fig. 1은 유도가열 시스템의 전류변환 부분(STACK)과 전원공급 부분(팬 및 전자보드부분)을 나타내었다.

2.2 유도가열 시스템의 구성부품

유도가열 시스템은 전류변환 및 전원공급 부분에 포함되는 각각의 부품과 부품이 결합된 어셈블리로 구분할 수 있다. 어셈블리는 그 기능과 접속에 의해 총 7개로 구성하였으며 개개의 부품은 22개로 구성하였다. Table 1은 유도가열시스템의 부품과 어셈블리를 나타내었다.

Table 1. Parts and assembly of IBHS

No.	Assembly	Parts
A1000	AC Breaker	P1100 Fuse
		P1200 SPD
		P1300 GND
		P1400 MCCB
A2000	AC filter	P2100 Inductor
		P2200 EMI filter
A3000	Inverter	P3100 Encapsulation
		P3200 Connectors
		P3300 IGBT
		P3400 IGBT/DSP board
		P3500 HMI
		P3600 Protective relays
		P3700 MC
		P3800 SMPS
		P3900 Fan(cooling)
		A4000
P4200 Tap		
A5000	Work coil	P5100 C/T (adjusting current)
		P5200 Capacitor
		P5300 Coupling
A6000	Cable	P6100 Aerial cables
A7000	CT/PT	P7100 CT/PT

3. FMEA 방법

3.1 유도가열시스템의 FMEA 절차

FMEA를 실행하기 위해서는 가장 먼저 해당 설비에 대한 도면이 완성되어야 한다. 도면을 바탕으로 구성 부품과 어셈블리리가 구분되어야 하고 이를 통하여 잠재 고장, 모드 및 영향을 분석해야 한다. 최종적으로 개개 부품에 대한 심각도, 발생도 및 검출도를 도출해야 하며 최종적으로 위험우선순위가 결정된다. Fig. 2는 FMEA 절차를 나타내었다⁵⁾.

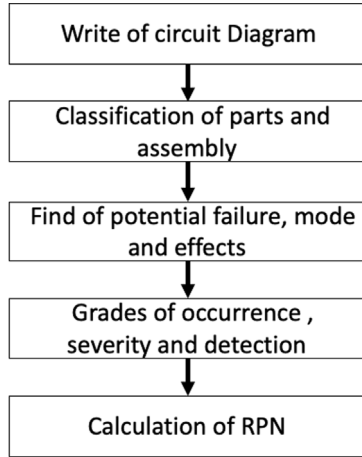


Fig. 2. Proceeding of FMEA.

3.2 유도가열시스템의 심각도, 발생도 및 검출도

FMEA는 부품의 단일 고장모드에 대하여 심각도, 발생도 및 검출도를 적용하는 방법이다. FMEA의 목적은 고장모드별 그 영향을 평가하는 것이다⁶⁾. 이런 고장모드 별의 영향평가를 위해서는 유도가열시스템에 포함된 구성부품을 분류하고 부품별 잠재고장모드, 잠재원인, 잠재영향을 분석하여 위험우선순위를 도출하면 가능하다. 유도가열시스템의 경우는 워킹 코일을 제외한 경우는 전력변환 즉 인버터가 들어간 반도체 및 전자부품을 참조하면 가능하다. 이런 전자부품에 대하여는 미국의 "SEMATECH"에서 제시하고 있다⁷⁾. 추가적으로 국제전기표준규격에 제시된 것을 이용하였다⁸⁾. 여기서 고장위험우선순위(RPN)는 식 (1)과 같은 심각도, 발생도, 검출도를 바탕으로 하고 있다.

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection \quad (1)$$

Table 2~4는 심각도, 발생도 및 검출도에 대한 각각의 기준을 나타냈다. 각각의 기준은 1~5 단계로 제시하였다⁷⁾. 따라서 RPN 값은 1과 125 사이로 값이 나오

Table 2. Severity ranking criteria^{7,8)}

Rank	Severity	Description
1	negligible	Failure is of such negligible nature of internal or external.
2	minor	Failure results in slight customer annoyance, and/or deterioration of system.
3	major	Failure results in major customer annoyance, and/or deterioration of system.
4	serious	Failure results in serious customer annoyance, and/or deterioration of system.
5	hazardous	Failure results in hazardous customer annoyance, and/or deterioration of system.

Table 3. Occurrence ranking criteria^{7,8)}

Rank	Occurrence	Description
1	almost never	An almost never probability of occurrence during the operating time interval.
2	remote	An remote probability of occurrence during the operating time interval.
3	medium	An medium probability of occurrence during the operating time interval.
4	moderately high	An moderately high probability of occurrence during the operating time interval.
5	very high	An very high probability of occurrence during the operating time interval.

Table 4. Detection ranking criteria^{7,8)}

Rank	Detection	Description
1	very high	Very high effectiveness that the defect will be detected.
2	moderately high	Moderately high effectiveness that the defect will be detected.
3	low	Low effectiveness that the defect will be detected.
4	remote	Remote effectiveness that the defect will be detected.
5	very remote	Very remote effectiveness that the defect will be detected.

며 숫자가 큰 것 순서가 관리 우선 순위가 된다는 의미를 포함하고 있다.

4. 유도가열시스템의 RPN 적용 및 강건설계 대상 선정

Table 5에서의 RPN에서 주요 문제점으로 거론되었던 부품들은 GND, 인버터, SMPS, C/T, 커패시터, 커플링이다.

GND는 “접지불량”의 원인이 발견되었으며 이는 공사 및 관리불량으로 확인되었으며, 모든 시스템의 철제 외함의 접지와 접지 접속부의 접촉불량에 대한 철저한 관리가 요구된다. 추가적으로 접속부의 접속상태 위치 표시를 추가하여 위치의 변화를 관찰할 필요가 있고 관리가 가능하기 때문에 강건설계 대상에서 제외하였다.

인버터는 스위칭 작용으로 인하여 직류에서 교류로 변환이 된다. ON/OFF의 스위칭 작동이 빈번하여 온도가 상승의 원인이 되고 이러한 온도 상승은 부품의 열화시킨다. 또 유도가열시스템에서 가장 중요한 것은 교류로 변환되면서 적합한 전압이 인가되어야 하는데 그렇지 않으면 유도가열시스템의 고장이 발생할 수 있다. 따라서 인버터의 부품을 FET로 바꾸어서 인가전압

Table 5. FMEA sheet

Item No.	Potential failure modes	Potential causes	Potential effects	S E C	O C C	D E C	R P N
1100 Fuse							
B1101	Premature open	Bad system configuration, mechanical defects, construction defect	No power output	5	1	2	10
B1102	Chipped	Bad system configuration, mechanical defects, construction defect	Overheating, excessive increase of current in the system	4	1	3	12
B1103	Fail to open	Bad system configuration, mechanical defects, construction defect	Overheating, excessive increase of current in the system	4	1	4	16
B1104	Slow to open	Bad system configuration, mechanical defects, construction defect	Overheating, excessive increase of current in the system	4	1	3	12
1200 SPD							
B1201	Missing	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Excessive increase of current in the system, overheating	4	3	1	12
B1202	Corrosion	Bad lamination, high voltage stress, hot spots	Humidity/contaminant/water entrance, increased degradation	4	3	1	12
B1203	leakage	Construction defect, improper maintenance, mechanical defects	Overheating, arcs, fire, safety	3	1	1	3
B1204	Damaged	Bad lamination, high voltage stress, hot spots	Humidity/contaminant/water entrance, increased degradation	4	1	4	16
B1205	Broken	Construction defect, improper maintenance, mechanical defects	Overheating, arcs, fire, safety	3	1	1	3
B1206	Bent	Construction defect, improper maintenance, mechanical defects	Overheating, arcs, fire, safety	4	1	1	4
B1207	Pressure incorrect	Bad lamination, high voltage stress, hot spots, aging	Overheating, arcs, fire, safety	3	1	1	3
B1208	Sheared	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Overheating, arcs, fire, safety	3	1	1	3
B1209	Warped	Construction defect, improper maintenance, mechanical defects	Overheating, arcs, fire, safety	3	1	1	3
B1210	Worn	Insulation breakdown, water/particles in oil, damages to structural parts	Reduced power output, no power output, safety, fire	3	1	2	6
1300 GND							
B1301	Open or ineffective	Corrosion, improper installation, too high resistance	Safety, reduced power output.	4	3	4	48
1400 MCCB							
B1401	No operation	Faulty switch, improper maintenance, aging, damages to structural parts	No disconnection, fire, arcs, safety	4	1	1	4
B1402	Open without stimuli	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	No power output	5	1	1	5
B1403	Intermittent operation	Corrosion, improper installation	Reduced power output, thermal damage	4	1	2	8
B1404	Does not open	Faulty switch, aging, damages to structural parts	No disconnection, fire, arcs, safety	4	1	4	16
B1405	Mechanical failure	Damages, improper installation, disconnections	Reduced power output, no power output	4	1	1	4
B1406	Degraded operation	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection, safety fire, arcs	4	1	3	12
B1407	Induced	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Reduced power output, no power output, safety, fire	4	1	3	12
B1408	Induced failure	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Reduced power output, no power output, safety, fire	4	1	3	12
B1409	Contamination	High voltage stress, hot spots, damage from frame distortion	Humidity/water/contaminant entrance	3	1	1	3
2100 Inductor							
B2101	Alignment improper	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Excessive increase of current in the system	2	2	2	8
2200 EMI filter							
B2201	Drift	Corrosion, improper installation, damage	Reduced power output, thermal damage	4	2	2	16
B2202	Intermittent operation	Corrosion, improper installation, lightning damage	Reduced power output, thermal damage	4	2	2	16
B2203	Open	Damage, disconnection, pulled cables	No power output	5	1	1	5
B2204	Short	Insulation breakdown, water/particles in oil, damages to structural parts	Reduced power output, no power output	5	1	1	5
B2205	Unknown	Unknown	Reduced power output, no power output	5	1	1	5

Table 5. Continued

Item No.	Potential failure modes	Potential causes	Potential effects	S E C	O C C	D E C	R P N
3100 Encapsulation							
B3101	Loss of air tightness	Bad lamination, high voltage stress, hot spots, temperature	Humidity/water/contaminant entrance	2	2	5	20
B3102	Improper response to electrical input	Bad lamination, high voltage stress, hot spots, temperature	Increased degradation, reduced power output	3	2	2	12
3200 Connectors							
B3201	Open	Damage, disconnection pulled cables	No power output	5	1	2	10
B3202	Mechanical failure	Damages, improper installation, disconnections	Reduced power output, no power output	4	1	1	4
B3203	Poor contact/intermittent	Corrosion, lightning damage, improper installation	Reduced power output, thermal damage	5	1	4	20
B3204	Induced failure	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Reduced power output, no power output, safety, fire	4	1	3	12
3300 IGBT							
B3301	Degraded output	MPPT unbalance	Reduced power output Transformer	4	4	3	48
B3302	Erratic operation	Insulation breakdown, water/particles in oil, transient overvoltage disturbance, damages to structural parts, continuous overvoltage, lack of protective device, shorting, improper maintenance, aging	Reduced power output Transformer	4	3	4	48
B3303	Fail to transfer	Contact damage, card/board problem, software failure	No power output	5	3	1	15
B3304	Parameter change	Failure of tap changer, improper maintenance, aging, damages to structural parts	Loss of efficiency, improper power output	3	3	2	18
B3305	Improper output	Insulation breakdown, water/particles in oil, damages to structural parts	Reduced power output, no power output, safety, fire	5	3	1	15
B3306	Open	Electric fire/burning, shorting, aging	No power output	5	3	1	15
B3307	Short	Insulation breakdown, shorting, lack of protective device, improper maintenance	Reduced power output, no power output, safety, fire	3	3	2	18
3400 IGBT/DSP board							
B3401	Induced failure	Construction defect, improper maintenance	Reduced power output, no data output, safety, fire	4	4	1	16
B3402	Parametric failure	Damages, improper installation, disconnections	Reduced power output, no power output	5	1	2	10
B3403	Mechanical failure	Damages, improper installation, disconnections	Reduced power output, no power output	4	1	1	4
B3404	Short	Inadequate protective device, improper setting of protective device	Structural damages with reduced power output	4	1	3	12
3500 HMI							
B3501	Improper output	Insulation breakdown, water/particles in oil, damages to structural parts	Reduced power output, no power output, safety, fire	5	3	1	15
B3502	No output	Electric fire/burning, shorting, aging	No data output	5	3	1	15
B3503	Electrical failure	Bad lamination, high voltage stress, hot spots, aging	Increased degradation	3	2	2	12
B3504	Intermittent	Corrosion, improper installation, lightning damage	Thermal damage	5	1	4	20
3600 Protective relays							
B3601	Fail to trip	Damage, disconnection, pulled cables	No power output	4	1	2	8
B3602	Spurious trip	Configuration, corrosion, aging, lack of maintenance	No power output	5	1	1	5
B3603	Short	Inadequate protective device, improper setting of protective device	Loss of protection	4	1	3	12
B3604	Bent	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Overheating	3	1	1	3
B3605	Broken	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	overheating, arcs, fire	3	1	1	3
B3606	Improper response to electrical input	Damage, disconnection, pulled cables	Increased degradation, reduced power output	4	1	2	8
B3607	Out of specification	Improper maintenance, Mechanical defects	Overheating, arcs, fire, safety	4	1	3	12
3700 MC							
B3701	Intermittent	Corrosion, improper installation, lightning damage	Thermal damage	4	2	2	16
B3702	Improper output	Insulation breakdown, water/particles in oil, damages to structural parts	Reduced power output, fire, safety	5	2	1	10
B3703	Open	Damage, disconnection, pulled cables	No power output	5	1	1	5
B3704	Short	Insulation breakdown, water/particles in oil, damages to structural parts	Reduced power output, fire, safety	5	1	1	5
3800 SMPS							
B3801	No operation	Damage, disconnection, High voltage, pulled cables	No voltage output	5	4	2	40
B3802	Degraded operation	Aged deterioration, equipment loss, corrosion, Damage	Reduced voltage output, safety, fire	5	3	3	45
B3803	Function failure	Damage, disconnection, pulled cables	No voltage output	4	2	1	8

Table 5. Continued

Item No.	Potential failure modes	Potential causes	Potential effects	S E C	O C C	D E C	R P N
3900 Fan(cooling)							
B3901	Inoperative	Damage, disconnection	Reduced power output, safety, fire	5	2	1	10
B3902	Broken	Construction defect, improper maintenance, mechanical defects	Overheating, arcs, fire, safety	4	2	1	8
B3903	Seized	Construction defect, improper maintenance, mechanical defects	Overheating, arcs, fire, safety	4	2	1	8
4100 Transformer							
B4101	Induced Failure	Construction defect, mechanical defects	Reduced power output, safety, fire	3	3	2	18
B4102	Degraded Operation	Aged deterioration, equipment loss, corrosion, damage	No power output, safety, fire	3	2	3	18
B4103	Unknown	Unknown	No power output, safety, fire	2	1	4	8
B4104	Mechanical Failure	Damages, improper installation, disconnections	Reduced power output, no power output	4	1	2	8
B4105	Opened	Damage, disconnection, pulled cables	No power output	5	1	1	5
4200 Tap							
B4201	Loose	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection.	2	3	3	18
B4202	Binding/Sticking	Bad lamination, hot spots, damage from frame distortion, cleaning actions	Humidity/water/contaminant entrance	3	2	2	12
B4203	Excessive Play	Damages to structural parts, particles in oil	No power output, safety	3	1	3	9
B4204	Induced Failure	Mechanical defects, improper maintenance	Safety, no energy output, fire reduced energy output	3	1	3	9
B4205	Worn	Insulation breakdown, water/particles in oil, damages to structural parts	No energy output, safety, fire reduced energy output	3	1	3	9
5100 Capacitor							
B5101	Cracked	Damages, improper installation, disconnections, High temperature,	Reduced power output, no power output	5	4	2	40
5200 C/T(adjusting current)							
B5201	Mechanical Failure	Damages, improper installation, disconnections	No power output	4	5	2	40
B5202	Unknown	Unknown	No power output, safety, fire	3	1	4	12
B5203	Opened	Damage, disconnection, pulled cables	No power output	5	1	1	5
B5204	Drift	Corrosion, improper installation, damage	No energy output, thermal damage	3	1	4	12
B5205	Shorted	Improper setting of protective device, improper maintenance, aging	No data output, safety, fire, explosion	4	1	3	12
5300 Coupling							
B5301	Worn	Insulation breakdown, water/particles in oil, damages to structural parts	Reduced energy output, no energy output, safety, fire	4	4	3	48
B5302	Broken	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection, safety, fire, arcs	4	2	1	8
B5303	Damaged	Damage from frame distortion, cleaning actions, earthquake	Humidity/water/contaminant entrance	3	2	3	18
B5304	Leakage	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Overheating, safety, arcs, fire	3	2	2	12
B5305	Missing	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Overheating, safety, arcs, fire	3	2	3	18
B5306	Fails During Operation	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection, fire, arcs, safety	3	1	3	9
B5307	Ruptured	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection, fire, arcs, safety	5	1	3	15
6100 Aerial cables							
B6101	Open	Faulty cabling, material aging, earthquake	No power output, safety	5	1	2	10
B6102	Broken	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection, safety, fire, arcs	3	1	1	3
B6103	Loose	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection, safety, fire, arcs	3	1	1	3
B6104	Short, Arc	Aging, insulation failure, cracks/ruptures on cables	No power output, safety, fire	5	1	1	5
B6105	Excessive wear	Improper system design	Reduced power output, thermal damages	3	1	1	3
B6106	Mechanical failure	Damages, improper installation, disconnections	Reduced power output, no power output	5	1	2	10
B6107	Out of specification	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	Overheating, safety, arcs, fire	3	1	4	12
7100 CT/PT							
B7101	Shorted	Improper setting of protective device, improper maintenance, aging	No data output, safety, fire, explosion	4	1	3	12
B7102	Opened	Damage, disconnection pulled cables	No power output	5	1	1	5
B7103	Unknown	Unknown	No data output, fire	5	1	1	5
B7104	Degraded operation	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection, safety, fire, arcs	4	1	3	12

을 높여주어 유도가열시스템의 고장을 방지하고 FET 도 스위치 작용으로 인한 과열로부터 방열판을 설치하여 화재사고로부터 방지하여야 한다.

SMPS는 각종 전자기기에 전원을 공급하는 장치로 해당 SMPS의 고장은 효율저하와 각종 안전장치에 문제를 야기한다. 따라서 현재 SMPS는 단방향인데 이중 안전구조가 요구된다.

커패시터는 전해질이 내·외부의 온도의 영향을 많이 받는 부품으로 실제 현장에서 65°C이상에서 폭발되는 사례들이 발견되었다⁹⁾. 또 커패시터의 용량 부족으로 인하여 유도가열시스템의 고장이 발생할 수 있다. 따라서 커패시터는 전해질로 인한 파괴가 낮고 온도에 강한 구성부품의 교체가 필요하며 유도가열시스템에서는 더 큰 용량을 가진 커패시터를 사용할 필요가 있다.

C/T는 적합하지 않은 전류로 워크 코일에 인가되면 유도가열시스템의 기계적 고장이 일어날 수 있다. 따라서 적합한 유도전류로 인가될 수 있는 부품을 사용해야 한다.

커플링은 기기의 구성부품들을 연결해주는 부품이다. 유도가열시스템에서 커플링의 역할은 매우 중요하고 수냉식으로 열을 제어하기 때문에 물의 영향을 무시하지 않을 수 없다. 또한 고무형태로 되어 있어 빠지는 현상이 일어나 부품에 고장이 발생할 수 있다. 커플링은 열에 강하고 물의 내성이 있는 부품의 교체가 필요하며 잘 빠지지 않는 부품을 사용해야 한다. Fig. 3은 초기에 개발된 커플링이다.

PFC는 역률보정 부품으로 교류 전력에서 직류 전력으로 전환하는 과정에서 발생하는 전력손실을 줄여주는 역할을 한다. 이 부품은 현재 유도가열시스템에 없는 부품이지만 유도가열시스템에서 발생 가능한 노이즈로 인한 시스템에 비정상적 작동을 일으킬 수 있으

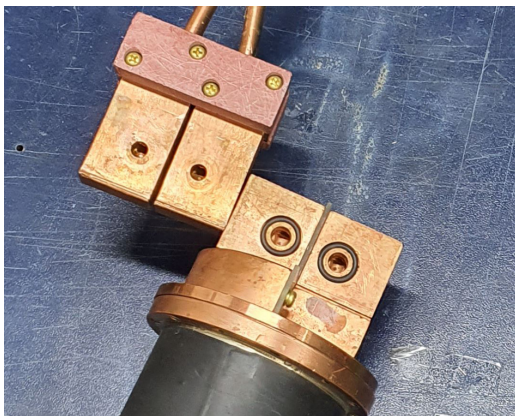


Fig. 3. Coupling of IBHS.

므로 PFC를 설치하여 노이즈를 억제시킬 필요가 있다. 이 부품은 따로 유도가열시스템에 추가하여 효율성과 안정성을 높일 수 있다.

RPN을 통하여 관리우선 부품은 GND이 해당되며, 강건설계는 인버터, SMPS, C/T, 커패시터, 커플링이 여기에 해당되었다.

5. 결론

본 연구에서 유도가열시스템의 잠재적 고장의 원인 및 영향에 대한 시스템의 작동별 위험요소를 도출하고, 도출된 위험요소를 바탕으로 FMEA의 RPN을 분석하였다. 그리고 RPN의 분석표를 바탕으로 강건설계 부품을 선정하였고 또한 RPN이 높은 위험부품에 대하여 구체적인 관리방안도 제시하였다.

1) FMEA를 통한 구성부품마다의 고장모드, 잠재원인, 잠재영향을 분류하여 최종 부품별 위험우선순위수(RPN)를 제시하였다.

2) 강건설계는 인버터, SMPS, C/T, 커패시터, 커플링이 선정되었다. 인버터는 유도가열시스템에 인가되는 전압을 더 높여줄 수 있는 FET로 부품으로 교체하였고, SMPS는 이중안전장치를 추가적으로 설치하였다. C/T는 적합한 유도전류가 유도될 수 있게 권선비를 조정하였다. 커패시터는 열과 내구성이 강한 제품으로 대체하였다. 커플링은 물의 내성이 있고, 연결부품이 잘 빠지지 않는 구조로 개선하였다. 관리부분에서는 접지가 선택되었으며 접속부의 접속불량이 일어나지 않도록 토크미터기를 통한 정기적인 관리를 필요로 한다.

3) 강건설계 부품 외에 추가적인 장치는 교류 전력에서 직류 전력으로 전환하는 과정에서 발생하는 전력손실을 줄여주기 위한 역률보정 장치인 PFC를 설치할 것을 제안하였다.

Acknowledgement: 본 논문은 중소벤처기업부에서 지원하는 2019년도 구매조건부신제품개발사업(S2780514)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- 1) Bolttech, "Induction Systems", www.bolttech.co.kr, 2021.
- 2) Miyaden Co., LTD, "Induction Heating Machine", www.miyaden.com, 2021.
- 3) D. H. Kim, S. C. Kim, J. S. Park, E. J. Kim and E. S. Kim, "Analysis of Risk Priority Number for Grid-connected Energy Storage System", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No.

- 2, pp. 1-8, 2016.
- 4) D. H. Kim, S. C. Kim, E. S. Kim and Y. H. Park, "Risk Assessment of Energy Storage System Using Event Tree Analysis", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 3, pp. 34-41, 2016.
- 5) IEC-60812 : Analysis Techniques for System Reliability-procedure for Failure Mode and Effects Analysis(FMEA), IEC, 2001.
- 6) H. K. Lim, System Safety Engineering, Hansol Academy, p. 93, 2012.
- 7) International Sematech, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): A Guide for Continuous Improvement for the Semiconductor Equipment Industry, 1992.
- 8) IEC 60812 Ed. 3.0 b, Failure Modes And Effects Analysis (FMEA And FMECA), 2018
- 9) M. Catelani, L. Ciani and E. Simoni, "Thermal Analysis of Critical components in Photovoltaic Inverter" IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2012.