

부스 바의 체결 및 중첩 구간에 따른 접촉 저항에 관한 연구

김현우, 손영득*
한국기술교육대학교 기계설비제어공학과

A Study on the Contact Resistance according to the Tightening and Overlapping area of Bus Bar

Hyun-Woo Kim, Yung-Deug Son*

Department of Mechanical Facility Control Engineering,
Korea University of Technology and Education

요약 부스 바는 초고층 빌딩의 전력공급과 플랜트 산업의 전원 공급부 및 장비 제조 산업 분야의 배전반에 널리 사용되는 전기적인 접속 구조이다. 부스 바의 설계 시 고려해야 할 사항으로 사용 환경에 따른 재질, 전원 용량에 따른 단면적, 표면 둘레의 길이, 체결 방법 등이 있다. 설계 시 충분한 전원 용량의 사이즈로 제작된 부스 바의 경우에도 실제 체결이 잘못 될 경우 열화에 의한 화재로 이어질 수 있다. 이러한 이유로 전기적 접촉부의 온도 상승에 대한 다양한 연구가 지속되어 왔다. 그러나 접촉부의 온도 상승은 결과에 기인한 현상이지 직접적인 원인은 아니다. 본 논문은 부스 바의 체결력과 중첩 구간에 따른 접촉 저항의 영향성에 대한 연구로 시편을 제작하여 저항의 변화를 측정하여 영향력을 분석하였다. 총 8개의 부스 바 시편을 제작하여 측정하였고 각각의 시편을 교차하여 체결시 가해지는 체결력과 중첩 구간의 간격을 가변하여 저항을 측정하였다. 실험 결과를 통해 이러한 요인이 실제 접촉 저항의 변화에 어느 정도 기여하는지를 분석하여 안전한 전원 연결 장치의 모델을 제시하고자 한다.

Abstract The bus bar is an electrical connection widely used for the power supply of skyscrapers and power distribution and industrial equipment electrical panels in industrial plants. There are various materials to be considered in the design of the bus bar, such as material based on the use environment, the sectional area according to the power capacity, the length of the surface circumference, and the tightening method. Even with a bus bar manufactured to a size of sufficient power capacity in the design, if the actual tightening is incorrect, it may lead to fire due to deterioration. For these reasons, a variety of research on the temperature rise of the electrical contact point has continued. However, the temperature rise of the contacts is a consequence of the result, not a direct cause. In this paper, the influence of contact resistance on the fastening force and the overlapping section of the bus bar are investigated by measuring the change in resistance from building the specimen. A total of eight bus bar specimens were manufactured and measured. Resistance was measured by varying the clamping force and the interval between overlapping sections when the specimens were crossed. We propose a safe power connection model by analyzing the contribution of these factors to the actual contact resistance change.

Keywords : a-spot, Bus bar, Contact resistance, Streamline effect, Overlapping, Torque

이 논문은 2018년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Yung-Deug Son(Korea University of Technology and Education)

Tel: +82-41-560-1297 email: ydson@koreatech.ac.kr

Received April 24, 2018

Revised (1st May 4, 2018, 2nd May 10, 2018)

Accepted July 6, 2018

Published July 31, 2018

1. 서론

1.1 부스 바의 전기적 접촉 형태

전기적인 접촉은 전류가 흐르는 폐회로에서 전원 공급의 연속성을 보장하는 통전부의 인터페이스로 정의된다. 즉 접점 인터페이스를 통해 전류 공급을 원활하게 하는 것에 목적이 있다. 이러한 전기 접촉은 인터페이스의 기구학적 형상, 도체의 재질, 표면처리, 온도, 부하량에 따라 복잡한 메커니즘을 거쳐 전기를 흐르게 하는데 접촉의 분류는 크게 구동형과 고정형으로 나눌 수 있다. 구동형은 일반적으로 사용되는 전원 플러그, 릴레이나 차단기의 접점과 같이 슬라이딩 및 마찰 접점이 지속적으로 동작하는 것이며, 고정형은 기계장치의 전원용 부스 바(Bus bar), 건물의 송배전부와 같이 한번 접속하면 수개월에서 수십년까지 고정되는 형태이다. 이러한 전기 접촉의 영향성에 대한 연구는 학회 및 산업체등 다양한 분야로 연구되어 왔다. 온도상승으로 인한 수배전반, 차단기 등에서 접촉 저항의 영향[1-2], 전기 판넬에서 과전류 등으로 인한 부스 바의 볼트 연결부의 온도상승 특성[3-4], 접촉면의 형상에 따른 접촉 저항 영향성에 대한 연구[5], 부스 바의 접촉 저항에 따른 열화 문제와 습기, 이물질 등의 외부 오염에 의한 문제를 해결하기 위해 블록형의 부스 바를 제작하여 해결하고자 하는 연구 등이 진행되었다. 그러나 산업 현장에서 사용하는 부스 바의 형태는 매우 다양하며 환경 조건도 다르기 때문에 모든 조건을 충족시키는 방법을 제시하기가 어려운 실정이다. 본 연구에서는 부스 바의 접촉 저항에 영향을 미치는 가장 중요한 요인인 체결력과 중첩 구간에 대해 설계 시 고려해야 할 사항을 제시하고 이를 실험을 통해 유효성을 증명한다.

1.2 부스 바의 전기적 접촉 저항

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 도체의 비저항(Cu, $1.72 \mu\Omega\cdot\text{cm}$), L 은 도체의 길이, A 는 도체의 단면적이다.

전기적인 접촉이 없는 경우에는 측정값이 식 (1)의 값과 거의 동일하지만 전기적인 접촉이 있는 경우 그 값이 증가한다. 이는 접촉 저항 증가에 있다. 전기적인 접촉은

도체와 도체의 인터페이스를 통해 발생되며 이 도체들 사이에서 실제로 전류가 흐를 수 있는 면적은 겉으로 보이는 접촉 면적과 차이가 있다. 접촉면의 기하학적 형상, 표면의 상태, 주위환경에 따라 실제로 전류가 흐를 수 있는 면적은 외관상의 접촉 영역과 달리 a-spot이라고 하는 축소된 면적으로 제한되며 Fig. 1과 같다. Fig. 1과 같이 보이듯이 두 개의 도체가 체결될 경우 접촉면을 확대해 보면 실제 전류가 흐를 수 있는 전도 경로는 a-spot으로 한정되어 진다. 그리고 접촉면에 작용하는 힘은 소성 변형된 a-spot의 면적과 접촉 재료의 경도에 의해 결정된다.

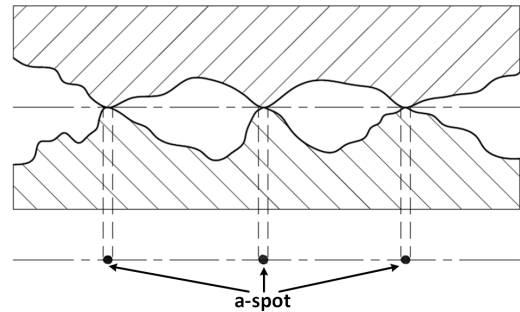


Fig. 1. Schematic of real contact area

Holm[6]은 접촉부의 돌기가 소성변형이고 a-spot이 충분하고 접촉부가 깨끗하다면 접촉 저항 R_C 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다고 제시하였다.

$$R_C = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{F}}, F = A_C H \quad (2)$$

여기서 F 는 접촉면에 가해지는 힘, A_C 는 기구적인 접촉 면적(a-spot들의 합계), H 는 체결 부재의 경도이다. 접촉 저항의 계산은 식 (2)와 같으나 실제 산업현장에 적용은 현실적으로 어려운 실정이다. 그 이유는 접촉상태에서 돌기면의 형상의 정확히 측정이 불가능하며 접촉면의 산화 정도, 전류의 크기에 따른 전류 흐름의 형태, 접촉부의 온도변화 그리고 주변 환경에 의한 요인 등을 모두 정확히 분석하는 것이 산업현장에서는 불가능하기 때문이다. 그러므로 접촉 저항에 영향을 주는 주요한 인자를 도출하여 실제 현장에서 관리할 수 있는 요소로 활용할 수 있는 방법이 필요하다.

2. 본론

2.1 부스 바의 설계 방법

전기 설비, 공장, 일반 전기 장비 및 장치에서 전원을 연결하고 분배하기 위해 부스 바 형태의 인터페이스가 널리 사용된다. 부스 바 설계 시 고려해야 할 사항 중 가장 큰 요소는 전원 용량의 크기이다. 용량이 결정되면 사용할 환경에 따른 재질의 선정이다. 실내인지 옥외인지, 일반 대기 중인지, 산화가 쉬운 환경인지, 열의 배출이 용이한지, 밀폐 되어 있는지 등에 따라 특성에 맞는 재질을 선택해야 한다. 이러한 부스 바에 일반적으로 사용되는 재료는 Cu와 Al 이다. 원재료를 그대로 사용하는 경우도 있으며, 환경적 요인으로 외부 접촉에 의한 부식과 산화를 억제하기 위해 Ni, Cr, Ag, Pt 등을 도금하여 사용하기도 한다. 용량과 부스 바의 재료 선정이 끝났으면 접촉의 형태와 조임 토크를 선정해야 한다. 일반적 설계 시 용량과 재질 선정에 대해서는 유의하여 설계하지만 접촉의 형태와 조임에 대해서는 충분히 고려되지 않는 경우가 있다. 부스 바의 단면 사이즈는 계산을 통해 적절한 용량을 선정할 수 있지만 접촉 저항은 계산을 통해 설계할 수 있는 부분이 아니기 때문이다. 원재료별 부스 바 설계에 대한 자료는 국내 및 해외 전기 규격집 및 차단기와 같은 계전기 제조사에서 제공하는 Tool을 이용한 용량 계산을 통해 사이즈를 설계할 수 있지만 접촉 저항은 설치 환경에 따라 변화하는 요소가 크기 때문에 현장 조건에 맞는 설계가 필요하다. 고정된 형태의 부스 바에서 전기적 접촉 저항에 영향을 주는 2가지 주요한 요인으로 부스 바 체결 시의 체결력과 중첩 구간이다. 이에 대해 분석한다.

첫 번째, 체결력에 따른 접촉 저항 R_C 는 식 (3)과 같이 정의 될 수 있으며 접촉면에 가해지는 힘 F는 조임 토크 T에 기인하는 것으로 식 (4)로 나타낼 수 있다.[7]

$$R_C = C/F^n \quad (3)$$

$$T = KDF \quad (4)$$

여기서 C와 n은 조인트 구성, 윤활제 유형 및 코팅 영향에 의한 상수, K는 너트 팩터로 나사 및 조인트의 마찰 계수, 표면처리 상태, 윤활 상태에 따라 변화하는 상수이고 D는 볼트의 지름이다.

식 (3)과 식 (4)을 이용하여 힘 F에 관한 식으로 정리하면 식(5)와 같으며 F는 조임 토크에 비례하고 접촉 저항에 반비례 관계를 알 수 있으며 실험을 통해 고찰한다.

항에 반비례 관계를 알 수 있으며 실험을 통해 고찰한다.

$$F = \sqrt[n]{\frac{C}{R_C}} = \frac{T}{KD} \quad (5)$$

두 번째, 고정된 체결에 있어 중요한 인자 중의 다른 하나는 체결부의 겹침 면적 즉 중첩 구간이 결정한다. 겹쳐진 형태의 전극에서 발생하는 저항 증가 현상을 유선 효과 (Streamline Effect)라고 한다. 직선형이 아닌 중첩 구간에서 전류의 흐름은 선형적으로 흐르지 않고 전류 왜곡이 발생되어 동일한 길이의 전극보다 높은 저항값을 가지게 된다. 이러한 저항의 증가는 접촉부에 주울열을 발생시켜 전극을 열화 시키는 요인이 될 수 있다. 이 유선효과 e는 중첩 구간의 길이 L과 부스 바의 두께 t의 관계에 의해 결정된다.

$$e = R\left(\frac{w}{\rho}\right)\left(\frac{1}{L/t}\right) \quad (6)$$

Melsom 과 Booth는 여러 가지 서로 다른 부스 바의 조합을 시험하여 Fig. 2와 같은 결과를 얻었으며 L/t 비율이 6의 지점 이후에서 전류 왜곡이 최소화 되어 안정화 되는 것을 확인하였다.[8]

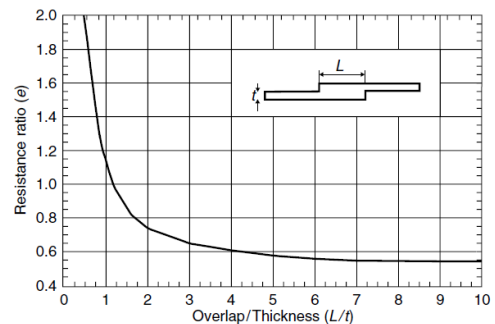


Fig. 2. Streamline effect of overlapping joint

2.2 부스 바 시편 및 측정 장비

체결력과 중첩구간에 따른 접촉 저항 영향성 실험을 위해 Fig. 3과 같이 부스 바 시편을 제작하였으며 시편의 재질은 Cu, 단면적이 30[mm](t) × 40[mm](w)이며 총길이는 200[mm]로 제작하였다. 시편은 총8개로 왼쪽 4개(①~④)는 40[mm] 간격으로 12[mm] hole을 가공하였고 오른쪽 4개(⑤~⑧)는 M10 Tap 가공을 하여 볼트 체결이 가능하도록 하였다. 또한, 접촉 저항 측정 실험을 위해 계측기는 $\mu\Omega$ 단위의 저항을 측정할 수 있는

Micro-Ohm meter로 MEGABRAS사의 MPK 모델을 사용하였으며 최대 $0.1\mu\Omega$ 의 측정 분해능을 갖고 있다. 측정 전류는 최대 200A까지 설정할 수 있어 큰 전류의 상태에서 발생하는 미소 저항까지 계측이 가능하다.

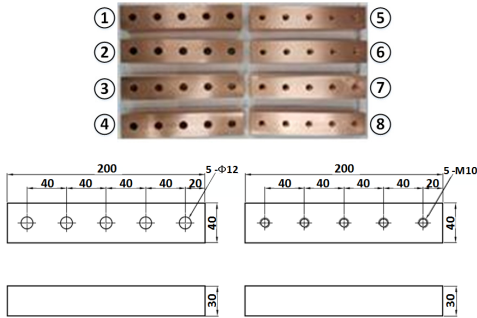


Fig. 3. Bus bar shape



Fig. 4. Micro-ohmmeter MPK-Model

2.3 실험 방법

2.3.1 토크별 접촉 저항 측정 실험 방법

접촉력에 따른 저항 변화를 측정하기 위해 우선 접촉의 형태를 구분하였다. 시편에 있는 Tap의 체결 개수에 따라 Tap 1개소에 체결한 경우부터 Tap 3개소에 체결하여 시편 ①과 ⑤, ②와 ⑥, ③과 ⑦, ④와 ⑧을 각각 체결하여 실험하였다. Fig. 5는 토크별 저항 측정에 관한 실험으로 P1과 P2에 측정 프로브를 설치하고 체결 Tap의 개수에 따라 겹침 구간 A-B의 거리를 가변하며 저항을 측정하였으며 Table 1에 각 실험의 조건을 나열하였다.

Table 1. Torque Test Table

Item	Number of M10 joints	A-B Distance[mm]	P1-P2 Distance[mm]	Applied Torque (kgf.cm)
Joint 1	1	40	320	0~300
Joint 2	2	80	280	
Joint 3	3	120	240	

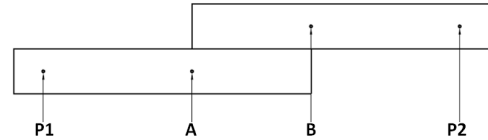


Fig. 5. Torque Test

볼트 체결 개수에 따라 Joint1, 2, 3으로 구분하였고 시편 Set 4개에 대해 토크를 가변하며 저항값을 측정하였다. 체결 토크는 도구를 이용하지 않고 사람의 손으로 체결한 경우를 토크 0으로 하고 이후부터 토크 렌치를 이용하여 50[kgf.cm]부터 순차적으로 토크를 상승시키며 측정하였다. 실제 토크 렌치를 사용하여 측정된 구간은 50~300[kgf.cm] 구간이다.

2.3.2 중첩 구간별 저항 측정 실험 방법

중첩 구간에 따른 저항 변화를 측정하기 위해 토크별 저항 측정과 유사한 방법으로 Tap의 체결 개수에 따라 Joint 명칭을 정의하였다. Tap 1개소만 체결한 경우 Joint1, 2개소 체결한 경우 Joint2로 결정하였고 총 5개소까지 체결한 저항의 값을 측정하였다. 이번 실험은 유선효과를 측정하는 것이 목적이기 때문에 체결 토크는 최대치 300[kgf.cm]으로 체결 후 측정하였다. 측정 지점은 겹침이 시작되는 지점에서 끝나는 지점에 측정 단자의 중심이 위치하도록 하였다. Fig.6은 중첩 구간에 따른 저항 측정 실험으로 저항 측정 지점은 P1과 P2이다. Table 2에 각 실험의 조건을 나열하였다.

2.4 실험 결과

2.4.1 토크별 접촉 저항 측정 실험 결과

Table.1의 조건으로 각각의 시편에 체결 토크를 가변하여 측정된 저항값의 그래프는 Fig. 7과 같다.

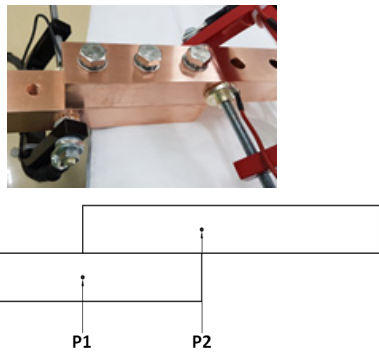


Fig. 6. Overlapping Test

Table 2. Overlapping Test Table

Item	Number of M10 joints	P1-P2 Distance[mm]	Applied Torque (kgf.cm)
Joint 1	1	40	300
Joint 2	2	80	
Joint 3	3	120	
Joint 4	4	160	
Joint 5	5	180	

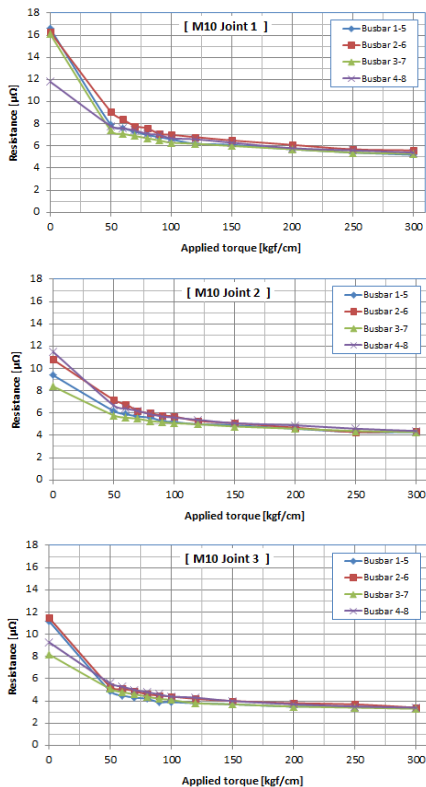


Fig. 7. Joint,2,3 Torque VS Resistance

각 Joint 별로 체결 토크를 증가함에 따라 시편의 전체 저항이 낮아짐을 확인할 수 있다. 그리고 조인트의 형태에 관계없이 모두 체결 토크에 비례하여 전체 저항이 감소하는 것을 확인하였으며 체결 토크가 250[kgf.cm] 이상에서는 0.1[μΩ]이내의 편차로 저항의 변화가 크지 않고 안정화 되고 있다. Table 3과 Fig. 8은 Fig. 7의 Joint1, 2, 3의 각 시험편의 값을 평균한 값으로 토크가 증가함에 따라 저항의 값이 안정화 됨을 알 수 있다.

Table 3. Torque Vs Resistance Avg. Table

Item	Applied Torque (kgf.cm)	Average of Resistance(μΩ)		
		Joint 1	Joint 2	Joint 3
1	0	15.2	10.0	10.1
2	50	8.1	6.5	5.2
3	60	7.7	6.2	4.9
4	70	7.4	5.9	4.7
5	80	7.1	5.7	4.5
6	90	6.9	5.5	4.3
7	100	6.7	5.4	4.2
8	120	6.5	5.2	4.0
9	150	6.2	5.0	3.9
10	200	5.8	4.7	3.6
11	250	5.5	4.4	3.5
12	300	5.4	4.4	3.4

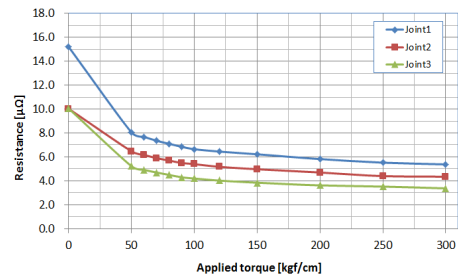


Fig. 8. Torque Vs Resistance Avg.

2.4.2 중첩 구간별 저항 측정 실험 결과

각 시편의 중첩 구간을 변경하며 측정된 결과는 Fig. 9과 같으며 중첩 구간에 비례하여 유선효과의 저항비도 낮게 측정되었다. 두께 대비 6배의 구간에서 가장 낮은 저항비를 나타내었고 시편마다 편차가 있었으나 동일한 경향을 보였다. 시편 1-5에서 가장 낮은 비율 곡선을 보였고 최저값 e는 0.58로 측정되었다.

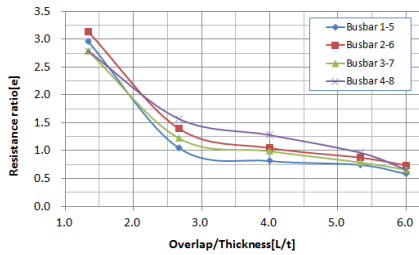


Fig. 9. Overlap Vs Resistance ratio(e).

Fig. 10은 Fig. 9의 각 시편의 중첩 구간별 저항 측정값에 대한 평균값을 나타낸 것이다. 중첩구간 비율이 높아질수록 0.5의 값에 가까워짐을 확인할 수 있다.

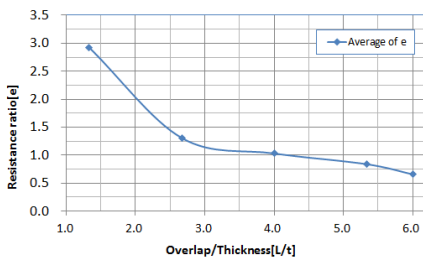


Fig. 10. Overlap Vs Resistance ratio(e). Avg.

3. 결론

위의 실험을 통해 2가지 접촉 저항 요소에 대해 살펴 보았다. 첫 번째, 체결 토크에 따른 저항의 변화와 두 번째, 중첩 구간의 비에 따른 유선평과에 대한 실험이다. 체결 토크별 저항 변화 실험의 측정 결과와 같이 부스 바 시편의 체결 토크가 증가할수록 전체 저항이 감소함을 확인할 수 있다. 저항의 감소는 체결부의 접촉 저항의 감소를 의미하며 일정 조임 토크 이상이 되면 감소되는 양이 매우 미세하여 더 큰 체결력이 접촉 저항의 감소로 이어지지 않는다. 부스 바의 체결 시 이러한 한계값을 고려하여 체결력을 선정하여야 한다. 적절한 조임 토크를 설정하기 위해서는 저항의 측정을 통한 접촉 저항의 영향을 분석하는 것이 중요하지만 가장 중요한 것은 전극 재료의 항복 응력값을 초과하는 힘을 가해서는 안된다는 것이다. 만약 이 탄성한계를 넘는 값으로 체결하게 되면 접촉면이 소형 변형되고 물리적으로 떨어져 나온 파편의 영향과 통전 시 열화와 냉각을 반복하면서 접촉면의 a-spot에 변형이 발생하여 최종 전극의 수명을 단

축시키는 결과를 얻게 된다.

그리고 중첩 구간별 실험에서 볼 수 있듯이 중첩구간과 두께의 비가 6배가 되는 지점에서 이상적인 저항 비율인 0.5에 가까워짐을 확인할 수 있다. 또한, 실험을 통해 확인한 바와 같이 최대한 중첩구간을 확보하는 것이 안전한 전극 설계에 중요한 요인이다. 하지만 과도한 중첩 비율은 부스 바의 체결 지점을 늘리고 접촉을 어렵게 하여 다른 악영향을 가져올 수 있다. 부스 바 설계 시 이러한 요인을 감안하여 최적의 체결 조건을 파악한다면 합리적인 부스 바 설계가 될 것으로 기대한다.

References

- [1] S.K. Park, J.C. Lee, Yonn J. Kim "Effects of Contact Resistance on Temperature Rise in a MCCB", *Energy Engg. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 12-19, 2004.
- [2] Heung-Soo Jung, "Study for temperature rise on busbar of the switchgear and controlgear assemblies" The KIEE Conference, 2015.7, pp. 872-873, July, 2015.
- [3] Sung Won Park, Hyun Su Cho, Joon Yeob Lee, "Temperature Rise Simulation of Switchgear Copper Busbar Considering Contact Resistance at the Bolted Connection", The KIEE Conference, pp. 89-89, Oct. 2014.
- [4] S. Schlegel, S. Grossmann, H. Lobl, M. Hoidis, U. Kaltenborn, "Joint Resistance of Bolted Copper - Copper Busbar Joints Depending on Joint Force at Temperatures beyond 105 °C", *2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 1-8, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2010.5619459>
- [5] Yeon-ho Oh, Ki-dong song, Chin-ki Kim, Kwi-sik Kim, "Calculation of the Contact Resistance by Contact Surface", The KIEE Conference, pp. 1109-1111, July, 2004.
- [6] Holm, R., *Electrical Contacts*, Springer, New York, 1979.
- [7] Braunovic', M., Evaluation of different contact aid compounds for aluminum-to-copper connections, *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 216-224, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1109/33.142896>
- [8] Milenko Braunovic', Valery V. Konchits, and Nikolai K. Myshkin, *Electrical Contacts : Fundamentals, Applications and Technology*, CRC Press, pp. 263-266, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780849391088>

김 현 우(Hyun-Woo Kim)

[준회원]



- 2000년 2월 : 한국기술교육대학교 제어기계공학과(공학사)
- 2016년 8월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계설비제어공학과 석사과정
- 2000년 1월 ~ 2011년 8월 : 세메스 선임
- 2011년 9월 ~ 현재 : 디바이스이엔지 수석연구원

<관심분야>

반도체 및 디스플레이 장비 설계, 자동제어

손 영 득(Yung-Deug Son)

[정회원]



- 2015년 2월 : 부산대학교 전자전기공학부 (공학박사)
- 2001년 2월 ~ 2009년 8월 : 현대중공업 선임연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계설비제어공학과 조교수, 전기기술사

<관심분야>

모터제어, 지능제어, 신재생에너지, 전기설비