

IT접지방식의 보호를 위한 활선절연저항 감시기

김용중¹, 김효성[†]

Protective Insulation Monitoring Device in IT Earth Systems

Yong-Jung Kim¹ and Hyosung Kim[†]

Abstract

With the increasing popularity of renewable generation systems and the advancement of power electronics, DC distribution systems have recently received considerable research attention. DC distribution has numerous advantages, including reliability, power quality, and efficiency. Owing to these advantages, DC distribution has been applied to data centers and power quality-sensitive electronic load conditions. Because grounding electrodes in DC are much more susceptible to corrosion than in AC, the IT system defined in IEC Standard 60364 may be a good candidate for an earthing method for DC distribution systems. In addition, IEC Standard 61557 specifies the requirements for insulation monitoring devices (IMD) for protection of the IT system, which continuously monitors the insulation resistances between the power lines and the earth. This paper discusses the development and evaluation of IMD to promote the reliability of distribution systems and increase safety of humans and facilities.

Key words: IT system, DC distribution system, IMD, Insulation resistance

1. 서 론

신재생에너지를 이용한 분산발전의 발달과 디지털부하의 증가로 인해 DC배전에 대한 관심이 높아지고 있고^{[1]-[3]}, 그에 따른 접지방식 및 보호 장치에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[4]-[5]}. IEC 60364는 전기설비에 따른 접지방식을 3가지로 분류하고 있으며 접지방식은 전력선의 전원접지와 수용가 측 도전성외함의 접지방식에 따라 나뉜다^[6].

그림 1은 3가지 접지방식을 나타내며, 3가지 접지방식은 전력선과 수용가 측 도전성 외함의 보호도체 설치에 관련된 주요한 차이점을 갖는다. TT 접지방식은 전력선의 전원접지와 수용가 측 도전성 외함의 접지가 독립적으로 설치되며, TN 접지방식은 기본적으로 전원접지와 수용가 측 도전성 외함의 접지가 공통으로 연결되며, 세부적으로 전원 접지와 사용자설비를 독립적으로 접지하는 TN-S 접지방식과 전원접지와 사용자설비를 공통으로 접지하는 TN-C 접지

방식으로 나뉜다. 반면 IT 접지방식의 경우, 전력선의 어느 쪽도 대지와 접지하지 않고 수용가 측 도전성 외함만을 접지한다. 이들 중 IT 접지방식은 접지 극의 전식문제가 발생하지 않으므로 AC배전계통에 비하여 전식문제가 심각한 DC배전계통에 가장 적합한 것으로 전망되고 있으며^[7], IT 접지방식은 TT 접지방식과 TN 접지방식에 비해 우수한 지락사고 특성을 갖는다.

TT 접지방식 및 TN 접지방식은 전력선의 한 선을 보호도체를 통해 대지로 접지하기 때문에 전력선에 어느 한 선이라도 지락사고가 발생하면 보호도체에 의해 전원간 폐회로가 구성되어 과도한 사고전류를 야기한다. 반면, IT 접지방식은 전력선에 1선 지락이 발생하더라도 전원으로부터 폐회로가 구성되지 않기 때문에 전원차단 없이 부하의 연속적인 운전을 유지할 수 있는 장점이 있다^{[8]-[9]}. 하지만 IT 접지방식에서 2선 지락이 발생한다면, IT 접지방식은 TT 접지방식과 TN 접지방식에서와 같은 지락사고를 피할 수 없다. 그러므로 IT 접지방식의 장점을 확보하기 위해서는 1선 지락이 발생하였을 경우 사고를 발견하고 사고발생 원인을 제거함으로써 2선 지락 사고로 이어지는 것을 예방하여야 한다.

TT 접지방식 및 TN 접지방식과 달리 IT 접지방식은 1선 지락사고 발생 시 전력선과 대지사이에 절연저항이 감소하는 것이 특징이다. 절연저항은 전력선과 대지사이에 존재하는 저항성분으로써, 기후 및 지락사고, 전력선의

Paper number: TKPE-2015-20-3-2

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

¹ Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University

Manuscript received Dec. 10, 2014; accepted Mar. 31, 2015

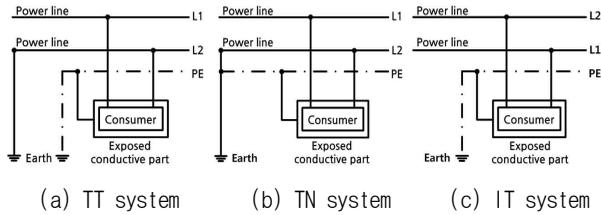


Fig. 1. Earthing systems in regard to ground of power lines and exposed conductive part.

경년변화, 낙뢰로 인해 전력선과 대지사이의 절연저항 저하현상이 발생할 수 있으며, 이러한 절연저항 저하현상은 절연과피로 이어져 감전 및 화재로 인한 인명 및 설비의 안전성을 위협할 수 있다. 이를 위하여 IEC 61557은 IT 접지방식 환경에서 활성절연저항 감시 장치를 설치하여 IT 접지방식의 1선 지락사고에 따른 절연저항저하를 감지하고 예기치 않게 발생하는 2선 지락사고로 인한 설비 및 인체를 보호하도록 규정하고 있다^[10]. 이에 따라 IT 접지방식의 안전성을 위한 절연저항 측정 방법들이 연구되고 있다.

그 중 저주파 AC주입방법은 DC전원계통과 대지접지에 작은 저주파 AC전원을 주입하고 저주파 AC전원에 의한 전류를 측정하여 전력선과 대지사이의 절연저항을 측정한다. 이 방법은 구현이 용이한 반면, AC전원에 따른 측정전류는 전력선과 대지사이의 절연저항뿐만 아니라 기생커패시턴스의 영향을 받는 것이 단점이다^[11].

또 다른 방법으로 다중 스위치 기반의 절연저항 측정방법은 DC계통과 직접 연결된 4개의 스위치를 on-off하여, 추가적인 전원 없이 각 스위칭모드에 따른 측정전압을 연산하여 절연저항을 측정하는 방법이다. 하지만 다중 스위치 기반의 절연저항 측정방법은 전원계통의 내부저항성분을 고려하지 않았기 때문에 실제 환경에 적용하기 어려운 단점이 있다^[12].

본 논문은 전원계통의 내부저항성분을 고려한 절연저항 측정알고리즘 및 전력선과 대지사이의 기생커패시턴스에 대한 영향을 최소화하기 위한 펄스전원 기반의 활성절연저항 감시기를 제안한다.

2. 제안하는 활성절연저항 감시원리 및 특성

2.1 활성절연저항 측정원리

그림 2는 전력선과 대지사이의 절연과피에 따른 사고를 예방하기 위하여 제안된 활성절연저항 감시기의 개념도를 나타낸다. 제안된 활성절연저항 감시기는 전력선에 직접 접속하며 브릿지저항 R_{bridge} 및 검출저항 R_t , 감시대상인 절연저항 R_{ins} , 대지로 구성된 폐루프에 펄스전압을 인가하여 절연저항 변화에 따른 검출저항 R_t 의 인가전압 V_t 를 측정함으로써 전력선의 절연저항을 관찰한다. 이 때, 전력선과 대지사이에는 기생커패시턴스성분을 포함하고 있기 때문에

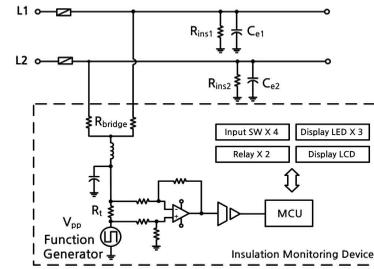


Fig. 2. Scheme of proposed IMD.

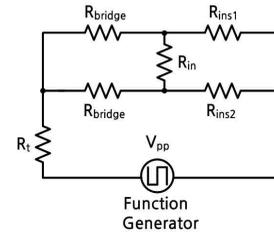


Fig. 3. Concept circuit for measuring insulation resistances.

펄스전원에 기생커패시터의 충전 및 방전으로 인한 과도적인 피크성 전압이 발생하며, 이러한 과도현상은 절연저항을 측정하기 위한 검출전압에 영향을 미칠 수 있다.

그러므로 제안하는 절연저항 측정방법에서 정확한 절연저항을 측정하기 위해선 검출전압의 안정구간에서 전압을 측정하는 것이 중요하다.

2.2 절연저항측정 알고리즘

제안된 활성절연저항 감시기는 인가된 펄스전압에 따른 검출저항에 인가되는 검출전압 V_t 를 측정함으로써 간접적으로 절연저항의 크기를 관찰하기 때문에 측정회로의 구성요소를 정확히 파악해야 한다.

절연저항측정을 위한 측정회로의 구성요소는 각 전력선의 절연저항 및 브릿지저항, 검출저항 이외에 미지의 전원계통 내부저항성분 R_{in} 을 반드시 고려해야 한다. 그림 3은 전원계통 내부저항성분 R_{in} 을 포함한 제안된 활성절연저항 감시기의 절연저항 측정을 위한 회로개념을 나타낸다. 이 때, 제안된 절연저항 측정회로는 전원계통 내부저항성분 R_{in} 으로 인해 휘스톤 브릿지구조임을 알 수 있다. 그러므로 절연저항 측정회로는 각 전력선의 절연저항의 비대칭 조건 및 대칭 조건에 따라서 상이한 해석을 요구한다. 또한 제안하는 활성절연저항 감시기는 검출저항에 인가되는 검출전압을 관찰하여 절연저항을 측정하기 때문에 검출전압에 대한 해석을 필요로 한다.

그림 3의 Function Generator는 제안된 활성절연저항 감시기의 입력전원을 나타낸다. 제안된 활성절연저항 감시기의 입력전원은 전력선과 대지사이의 기생커패시턴스에 의해 발생하는 위상지연과 같은 측정불안요소를 최소화하기 위해 펄스전원을 사용하였다. 제안된 활성절연저항 감시기 입력 펄스전압의 크기는 48V이며, 펄스전원의 주기는 전력선과 대지사이의 기생커패시턴스로 인한 과도현상 이후에 안정적인 검출전압측정을 위해 충분한 주기를 확보한다.

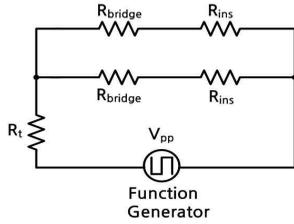


Fig. 4. Equivalent circuits for measuring insulation resistances in balanced condition.

2.2.1 절연저항의 대칭 조건

대칭적 조건의 절연저항 사고는 전력선의 동시적인 경년변화와 습기와 먼지 등의 다양한 환경적 요인으로 인한 전력선의 대칭적인 절연저하 등이 원인이 된다. 이러한 사고는 IT 접지방식에서 치명적 결과를 초래할 수 있다.

특정적으로 이러한 절연사고는 서서히 발생하고 절연저항의 값이 임계점 이하로 내려가는 경우 화재 등 큰 사고로 파급될 수 있으나 기존의 전압차이에 의한 검출 방식으로는 감시할 수 없으므로, 본 논문에서 제안하는 대칭적 조건 전용의 감시 장치를 사용하여 사고감시 및 예방을 할 필요가 있다.

각 전력선의 절연저항이 대칭 조건일 경우, 측정회로는 휘스톤 브릿지의 평형 조건이며 측정회로의 전류는 더 이상 전원계통의 내부저항으로 유입되지 않는다. 이는 측정회로에서 전원계통 내부저항성분의 영향을 무시할 수 있음을 의미한다. 그러므로 그림 3의 절연저항 측정회로는 그림 4와 같이 전원내부저항과 독립적인 절연저항 측정회로로 등가화 할 수 있다.

$$R_{tot_sym} = R_t + \frac{(R_{bridge} + R_{ins})}{2} \quad (1)$$

$$V_{t_sym} = \frac{R_t}{R_{tot_sym}} V_{pp} \quad (2)$$

$$R_{ins} = 2\left(\frac{V_{pp}}{V_{t_sym}} \cdot R_t - R_t - \frac{R_{bridge}}{2}\right) \quad (3)$$

식 (1)은 그림 4의 절연저항 대칭조건에 따른 절연저항 측정등가회로의 전체합성저항 R_{tot_sym} 을 나타내고 이를 통해 전체합성저항과 전력선의 대칭적인 절연저항 사이의 선형성을 확인 할 수 있다.

식 (2)은 그림 4의 절연저항 대칭조건에 따른 절연저항 측정등가회로의 검출전압 크기 V_{t_sym} 를 나타내며, 전원내부 저항에 대한 절연저항 측정등가회로의 독립성으로 인해 절연저항과 검출전압 사이의 관계는 반비례특성이 있음을 확인 할 수 있다. 식 (3)은 검출전압과 대칭적인 절연저항의 관계를 정리한 절연저항측정 알고리즘을 나타낸다.

2.2.2 절연저항의 비대칭 조건

비대칭적 조건의 절연저항 사고는 전원선의 돌발적인

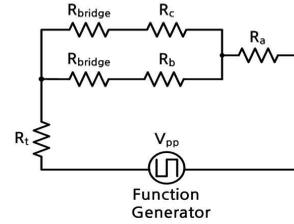


Fig. 5. Equivalent circuits for measuring insulation resistances in unbalanced condition.

비대칭적 접지, 또는 인체 접촉에 의한 감전 등이 원인이 된다. IT 접지방식에 있어서 이러한 사고는 설비와 인체에 즉각적으로 심각한 문제를 일으키지는 않지만, 장기적으로 다른 전원선에서도 같은 유형의 사고가 발생할 경우 문제가 될 수 있기 때문에, 조기에 사고를 파악하여 제거할 필요가 있다.

이러한 유형의 사고는 전통적으로 두 브릿지저항을 통하여 검출되는 전압을 차이를 차동증폭기로 검출함으로써 쉽게 감시할 수 있다. 본 논문에서는 추가적인 차동증폭형 검출기를 사용하지 않고 제안된 회로적 토폴로지를 활용할 가능성이 있는지 알아보기로 한다.

각 전력선의 절연저항이 비대칭 조건일 경우, 휘스톤 브릿지는 불평형 조건이기 때문에 측정회로는 그림 3의 절연저항 측정회로와 동일하며, 미지의 전원계통 내부저항성분 R_{in} 은 측정회로해석을 어렵게 하는 회로구성요소이다. 그러므로 측정회로의 용이한 해석을 위해 그림 3의 절연저항 측정회로를 Δ -Y변환하여, 그림 5의 비대칭 절연저항 측정등가회로로 변환한다. 그림 5의 Δ -Y변환에 따른 등가저항 R_a, R_b, R_c 의 크기는 식 (4), 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$R_a = \frac{R_{ins1} \times R_{ins2}}{R_{in} + R_{ins1} + R_{ins2}} \quad (4)$$

$$R_b = \frac{R_{in} \times R_{ins2}}{R_{in} + R_{ins1} + R_{ins2}} \quad (5)$$

$$R_c = \frac{R_{ins1} \times R_{in}}{R_{in} + R_{ins1} + R_{ins2}} \quad (6)$$

식 (7)은 Δ -Y변환에 따른 측정등가회로의 전체합성저항 R_{tot_asym} 을 나타내고, 식 (8)은 절연저항 비대칭조건에 따른 절연저항 측정등가회로의 검출전압 크기 V_{t_asym} 를 나타낸다.

$$R_{tot_asym} = R_t + \frac{(R_{bridge} + R_c)(R_{bridge} + R_b)}{(R_{bridge} + R_c) + (R_{bridge} + R_b)} + R_a \quad (7)$$

$$V_{t_asym} = \frac{R_t}{R_{tot_asym}} V_{pp} \quad (8)$$

식 (4), 식 (5), 식 (6)을 통해 Δ -Y변환에 따른 등가저항은 미지의 전원계통 내부저항성분에 의존적인 것을

확인할 수 있고 이는 전원계통 내부저항성분을 측정해야만 전력선의 절연저항을 측정할 수 있음을 의미한다.

또한 전원계통 내부저항성분은 불평형 상태인 절연저항의 개별적인 측정을 방해한다. 식 (7)과 식 (8)은 이러한 전원내부저항으로 인한 복잡성 때문에 각 전력선의 절연저항 변화에 따른 검출전압 해석이 용이하지 않음을 알 수 있다.

물론 차동증폭기로 불평형 상태를 검출함으로써 절연사고 유무를 간단히 판단할 수는 있으나, 불평형 절연저항의 값이 구체적으로 얼마인지 알아야할 필요도 있을 수 있으므로 이에 관한 연구는 후속과제로 수행하기로 한다.

3. 실험결과

3.1 실험환경

그림 6은 활선절연저항측정 실험환경을 나타낸다. 그림 7에서 절연저항 시험대는 활선상태인 절연저항에 전기적인 외부영향을 최소화 하기위해 절연체를 사용하여 제작되었고, DC과워서플라이를 이용해 DC배전환경을 모의하였다. 절연저항 측정실험의 절연저항 측정범위는 10kΩ~1MΩ이며, 특히 높은 DC전원환경에서 10kΩ~100kΩ의 절연저항을 측정할 경우 실험용 모의 절연저항에서 높은 소비전력이 발생할 수 있기 때문에 허용전력이 충분히 높고 허용오차가 1%인 권선저항을 사용하였다.

3.2 검출전압 특성실험

그림 7은 절연저항 변화에 따른 검출전압 V_t 의 파형을 나타낸다. 그림 7의 상단 전압파형은 검출전압 V_t 의 파형을 나타내고 하단 전압파형은 검출전압의 변화를 관찰하기 위해 MCU의 허용입력전압으로 변환된 전압파형을 나타낸다. 그림 7에서 전력선의 대칭적인 절연저항은 0Ω, 10kΩ, 100kΩ, 1MΩ으로 변화하며, 검출전압은 절연저항과 반비례특성에 의해 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

3.3 활선절연저항 측정결과

그림 8은 제안된 활선절연저항감시기를 이용하여 DC 전원전압이 0V~300V으로 변화하는 활선상태인 전력선에 10kΩ~1MΩ 범위의 대칭적인 절연저항변화 측정실험에 따른 절연저항 측정그래프이다. 그림 8의 측정그래프는 다양한 전원조건에서 대칭적인 절연저항변화에 선형적인 활선절연저항 감시기의 동작특성을 확인 할 수 있다. 그림 8(a)의 10kΩ~100kΩ 구간 측정그래프는 전체적으로 선형성을 나타내지만 40kΩ 미만의 낮은 저항구간에서 작은 오차가 발생함을 확인 할 수 있다. 그림 8(b)는 100kΩ~1MΩ 구간의 활선절연저항 측정 그래프를 나타내며, 전체적으로 선형적인 측정결과를 나타낸다.

그림 9는 제안된 활선절연저항 감시기의 10kΩ~1MΩ 측정에 따른 절연저항 측정오차그래프를 나타낸다. 그림 9(a)는 10kΩ~100kΩ 구간의 활선절연저항 측정오차그래프를 나타내며, 그림 9(a)를 통해 40kΩ 미만의 낮은 저항구간에서 측정오차가 상대적으로 큰 것을 확인 할 수 있다.



Fig. 6. Experimental environment for monitoring insulation resistances.

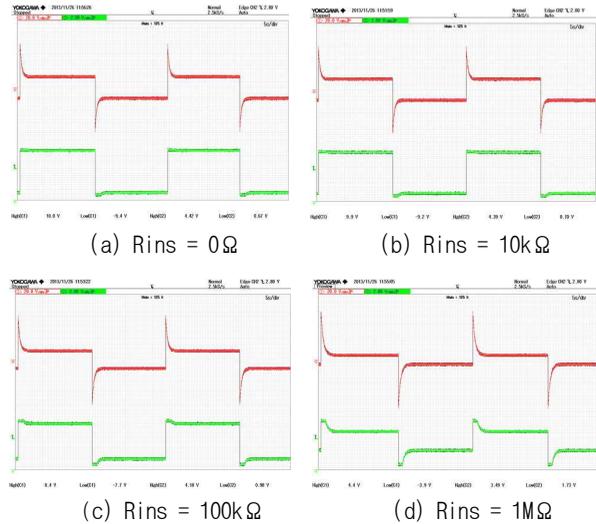


Fig. 7. Waveform of V_t and MCU input.

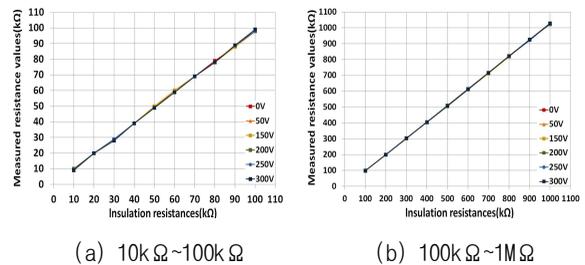


Fig. 8. Measurement graphs in 10kΩ~1MΩ.

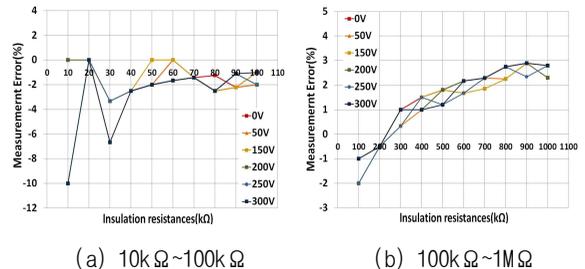


Fig. 9. Measurement error rate graphs in 10kΩ~1MΩ.

이러한 상대적인 큰 오차의 발생원인은 활선절연저항 감시기에 사용한 MCU의 낮은 측정분해능으로 추정된다. 그림 9(b)는 100kΩ~1MΩ 구간의 활선절연저항 측정 오차그래프를 나타내며, 100kΩ~1MΩ 구간의 측정오차율은 3%로 수렴하는 패턴을 나타낸다. 그러므로 그림 9에서 평가되는 제안된 활선절연저항 감시기의 측정오차율은 10%이내임을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 DC전원계통에 적용성이 높은 IT 접지 방식의 인체와 설비보호를 위한 계전기로서 활선 상태인 전력선의 절연저항을 측정·감시할 수 있는 활선절연 저항감시기를 개발하고 성능을 검증하였다.

본 논문은 전력선과 대지사이에 기생커패시턴스의 영향을 최소화하기 위한 펄스전원 기반의 절연저항 측정방법을 제안하였으며, 대칭조건에 따른 절연저항측정 이론과 그에 따른 측정알고리즘을 개발하였다. 또한 제안한 감시기 토폴로지를 활용하여 미지의 전원내부저항을 고려한 절연저항 측정회로해석을 통해 절연저항의 비대칭조건에 따른 개별적인 절연저항측정의 가능성에 대하여도 고찰하였다.

개발된 활선절연저항 감시기를 이용하여 다양한 전원조건에 따른 전력선의 대칭적인 절연저항변화를 측정하였으며, 그 결과 제안된 활선절연저항 감시기의 동작은 활선상태인 전력선의 대칭적인 절연저항변화를 선형적으로 추정하였으며, 절연저항변화의 측정오차는 10%이내임을 확인 하였다.

측정오차특성은 절연저항이 점차 감소할수록 오차가 증가하는 것을 확인 하였다. 이러한 측정오차특성 원인은 측정 장치의 낮은 측정분해능에 따른 문제로 추정되며, 이러한 기능적인 문제가 해결된다면 보다 좋은 성능을 보일 것으로 기대된다.

개발된 활선절연저항 감시기는 계통전압 변화와 상관없이 전력선의 동시적인 경년변화와 습기와 먼지 및 다양한 환경적 요인으로 인한 전력선의 대칭적인 절연저하 사고감시 및 예방에 효과적일 것으로 예상된다.

향후 연구에서는 측정 장치의 측정분해능을 향상시켜 측정오차특성을 개선할 필요가 있으며, 본 장치를 활용한 비대칭 절연저항을 측정하기 위한 센서 및 알고리즘의 개발이 요구된다.

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2012R1A1A2039747)

References

- [1] V. Sithimolada and P. W. Sauer, "Facility-level DC vs. typical ac distribution for data centers: A comparative reliability study," *IENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference*, pp. 2102-2107, Nov. 2010.
- [2] D. Salomonsson and A. Sannino, "Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads," *Power Delivery, IEEE Transactions*, Vol. 22, pp. 1620-1627, Jul. 2010.
- [3] F. Dastgeer and A. Kalam, "Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation,"

Power Engineering Conference, AUPEC 2009 Australasian Universities. IEEE, pp. 1-5, Sep. 2009.

- [4] K. Hirose, T. Tanaka, T. Babasaki, S. Person, O. Foucault, B. J. Sonnenberg, and M. Szpek, "Grounding concept considerations and recommendations for 400VDC distribution system," *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International*, pp. 1-8, Oct. 2011.
- [5] R. M. Cuzner and G. Venkataramanan, "The status of DC micro-grid protection," *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE*, pp. 1-8, Oct. 2008.
- [6] ICE Standard No.60364-1, "DC short-circuit analysis for systems with static sources," International Electrotechnical Commission.
- [7] K. Engelen, E. Leung Shun, P. Vermeyen, I. Pardon, R. D'hulst, J. Driesen, and R. Belmans, "The feasibility of small-scale residential DC distribution systems," *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on*, pp. 2618-2623, Nov. 2006.
- [8] D. Salomonsson, L. Soder and A. Sannino, "Protection of low-voltage DC microgrids," *Power Delivery, IEEE Transactions*, Vol. 24, pp. 1045-1053, Jul. 2009.
- [9] W. I. Bower and J. C. Wiles, "Analysis of grounded and ungrounded photovoltaic systems," *Photovoltaic Energy Conversion, 1994, 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference on*, Vol. 1, pp. 809-812, Dec. 1994.
- [10] IEC Standard No. 61557-8, "Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1,000 V a.c. and 1,500V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures: Part 8 Insulation monitoring devices for IT systems," International Electrotechnical Commission.
- [11] J. A. Marrero, "Understand ground fault detection and isolation in DC systems," *Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE*, Vol. 3, pp. 1707-1711, Jul. 2000.
- [12] J. Jiang and H. Ji, "Study of insulation monitoring device for DC system based on multi-switch combination," *Computational Intelligence and Design, ISCID'09. Second International Symposium on. IEEE*, Vol. 1, pp. 429-433, Dec. 2009.



김용중(金龍中)

1988년 11월 10일생. 2007년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2015년 동 대학원 전기전자제어공학과 석사졸업. 2015년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 박사과정.



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~1997년 일본 오가야마대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.