

# 변전소 자동화 시스템의 신뢰도 해석에 관한 연구

## A Study on Reliability Analysis of Substation Automation System

박철원\*  
(Chul-Won Park)

**Abstract** - Electrical energy supply interruption degrades reliability of power supply as well as social costs and economic loss. It is important to assess the reliability of the power system. Nowadays IEC61850 based substation automation system(SAS) has been developed for an updating of automation and interoperability. In this study, three kinds of reliability block diagram(RBD) were proposed to examine of network availability of the three types SAS. And reliability and unreliability of the SAS was formulated using the RBD. Finally, while varying the value of reliability and unreliability, the reliability and the unreliability of the overall system were evaluated.

**Key Words** : Availability, Interoperability, Reliability, Reliability block diagram(RBD), Substation automation system(SAS), Unreliability

### 1. 서론

전기에너지의 공급 중단은 사회적 비용과 경제적 손실을 가져올 뿐만 아니라 전력공급의 신뢰도를 떨어뜨린다. 경제적 이득과 신뢰도를 향상시키는 데 필요한 경제적 부담은 서로 상충되기 때문에 투자대상과 범위의 결정이 매우 중요하다.

국내 변전소의 신뢰도 평가로는 고장상태와 정상상태로 구성되는 2가지 상태 모델로부터 스위칭 조작을 고려한 3가지 상태(three state) 모델이 제시되었다[1]. 신뢰도 평가기법은 신뢰도 지수의 평가 방법에 따라 해석적 방법과 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션 방법으로 대별되는 데, 사고 후의 스위칭 조작을 고려할 때는 몬테카를로 방법이 적합하다. 그러나 변전소 구성요소의 고장과 수리, 보수와 관계에 대해서는 확률변수가 사용된다[2]. 신뢰도 모델수립 및 평가를 위해서는 고장실적 데이터가 매우 중요한 변수로 작용되기 때문에 가정된 데이터가 아닌 실제 한전시스템 고장실적 데이터를 이용한 모델수립과 고장률계산에 관한 연구가 이루어졌다[3]. 또 고장통계를 이용하여 설비별 고장률을 도출한 후 송변전 설비의 신뢰도를 통하여 전력공급 신뢰도를 계산하였다[4]. 배전계통의 기기의 고장데이터로부터 고장률을 추출한 후, 시변고장률과 시변고장률을 활용한 신뢰도에 미치는 영향이 분석되었다[5].

한편, 변전소내 전력설비의 첨단화 및 자동화를 통하여 감시, 제어, 계측 및 보호계전 기능 등을 처리하는 시스템인 IEC61850 기반 변전소 자동화시스템(Substation Automation

System : SAS)이 상호운용성(interoperability)을 용이하게 하도록 개발된 이래, 2012년 후반부터 신설 변전소에 적용이 되고 있다[6]. 그런데 전국에 산재된 670여개의 154kV 변전소를 전원차단(power off)없이 개조(retrofit)나 교체(replacement)로 SAS로 구축하는 것은 단기간에 수행하기 힘들기 때문에 정책적인 디지털 방안 수립이 진행되고 있다 [7, 8]. 이에 따라 기존 변전시스템과는 획기적으로 다른 SAS를 적용하기 위해서는, SAS 도입 방향 설정과 현장 적용 기준수립이 요구되며, 나아가 SAS 지능화 구축을 통한 전력계통의 고 신뢰성 유지 방안이 필요하다[9-11]. 최근 변전소 자동화시스템과 관련된 연구로, 차세대 스마트 변전소의 기술과 경제성 분석[12], UK 국립 그리드 표준화 변전소 자동화 솔루션을 위한 IEC 61850 기반 아키텍처의 성능 테스트[13] 등이 2015년 IEEE PES GM에서 발표되었다.

본 연구에서는 3가지 SAS 네트워크 구조의 가용성(availability)을 검토하기 위하여 3가지 SAS의 신뢰도 블록도(reliability block diagram : RBD)를 제안하였고 RBD를 이용한 신뢰도와 비 신뢰도를 정식화하였다. 끝으로 가정한 신뢰도 값과 비 신뢰도 값을 가변하면서 전체 시스템의 신뢰도와 비 신뢰도를 평가하고자 한다.

### 2. SAS 네트워크의 모델

#### 2.1 네트워크 모델링 개념

실제의 시스템은 직렬, 병렬, 망(mesh) 또는 직병렬 조합으로 서로 연결된 시스템 구성요소 중의 하나인 네트워크로 표현된다. 먼저, 네트워크 신뢰도를 평가하는데 사용될 수 있는 분석적인 기술을 검토하기 위하여 시스템과 네트워크 모델 사이의 관계를 살펴본다[7, 15-18].

#### 2.1.1 직렬 시스템

그림 1은 두개의 구성요소로 구성된 직렬 시스템이다. 그림 1의 양단 신뢰도 지점으로부터 A와 B가 직렬로 연결된

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-Wonju National University, Korea

E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2015년 11월 3일

수정일자 : 2015년 11월 23일

최종완료 : 2015년 11월 27일

직렬 시스템에서,  $R_A, R_B$ 는 성분 A와 B의 성공 가능성(probability of successful operation)이라 하고,  $Q_A, Q_B$ 는 성분 A와 B의 실패 가능성(probability of failure)이라 가정한다.

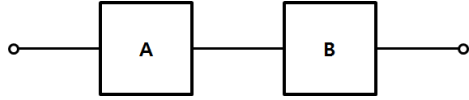


그림 1 직렬 시스템  
Fig. 1 Series system

성공과 실패는 상호 배타적이기 때문에  $R_A + Q_A = 1$ ,  $R_B + Q_B = 1$ 가 된다. 그러므로 시스템의 신뢰도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_S = R_A \cdot R_B \tag{1}$$

직렬 요소가  $n$ 개라면, 신뢰도는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \tag{2}$$

이에 따라 시스템의 비 신뢰도(unreliability)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_S &= 1 - R_A R_B \\ &= 1 - (1 - Q_A)(1 - Q_B) \\ &= Q_A + Q_B - Q_A \cdot Q_B \end{aligned} \tag{3}$$

유사하게 직렬 요소가  $n$ 개인 경우의 비 신뢰도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_S = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \tag{4}$$

### 2.1.2 병렬 시스템

그림 2는 두개의 구성요소로 구성된 병렬 시스템이다. 그림 2의 양단 신뢰도 지점으로부터 A와 B가 병렬로 연결된 병렬 시스템에서, 시스템의 신뢰도는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

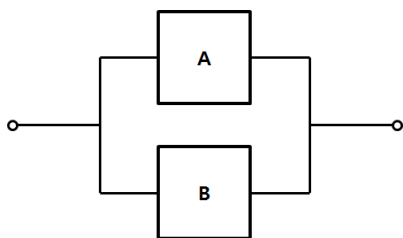


그림 2 병렬 시스템  
Fig. 2 Parallel system

$$\begin{aligned} R_p &= 1 - Q_A \cdot Q_B \\ &= R_A + R_B - R_A \cdot R_B \end{aligned} \tag{5}$$

병렬 요소가  $n$ 개라면, 신뢰도는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \tag{6}$$

이에 따라 시스템의 비 신뢰도는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_p = Q_A \cdot Q_B \tag{7}$$

유사하게 병렬 요소가  $n$ 개인 경우, 비 신뢰도는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_p = \prod_{i=1}^n Q_i \tag{8}$$

### 2.1.3 직병렬 시스템

직병렬 시스템의 일반적인 원리는 순차적으로 하나의 구성요소가 남을 때 까지 적절한 신뢰성 모델의 직렬과 병렬을 조합함으로써 복잡한 배치를 줄여서 등가화하면 된다. 이 간소화된 등가화는 본래 배치의 신뢰도와 또는 비 신뢰도를 나타내고 평가할 수 있다[7, 15-18].

## 3. SA 구조의 가용성 비교

### 3.1 변전소 자동화 구조의 구성요소

전형적인 SAS는 구성요소의 집합과 몇 개의 레벨(level)로 구성되는데, 주요 구성요소는 다음과 같다[7, 8, 14, 15].

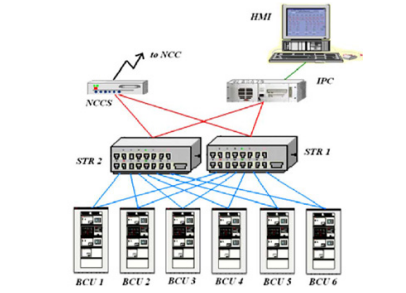
- A human-machine interface (HMI)
- Industrial personal computer (IPC)
- Network control center (NCC) server
- Various substation IEDs
- Bay control unit (BCU)
- Dc power supply (DCP)
- Communications facilities (Ethernet switch : ESW), Ethernet interface (EI), Fiber-optic connection (OPT))
- Star coupler (STR)

### 3.2 변전소 자동화 구조의 다양성

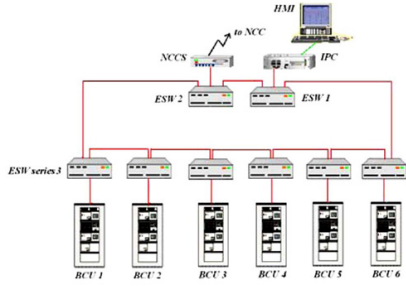
각 변전소 자동화 구조는 베이(bay) 제어를 갖는 6개의 베이로 가정한다. 그림 3은 double-star coupler, decentralized ring coupler, hybrid의 3가지 SAS 구조를 나타낸다[7, 8, 14, 15].

### 3.3 신뢰도 블록도

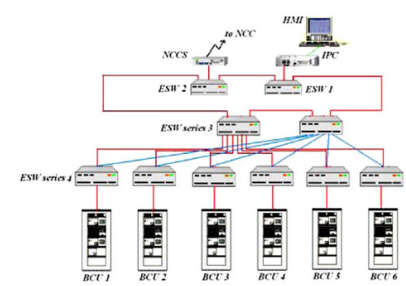
가용성을 계산하는 첫 번째 단계인 신뢰도 블록도(Reliability Block Diagram : RBD)는 시스템의 기능을 설명



(a) 구조 1 : double-star coupler



(b) 구조 2 : decentralized ring coupler



(c) 구조 3 : hybrid

그림 3 변전소 자동화 구조

Fig. 3 Substation automation system architecture

하는 success-oriented 네트워크이다. RBD는 특정 시스템의 기능을 달성하기 위해 필요로 하는 구성요소의 논리적인 결선을 나타내 준다.

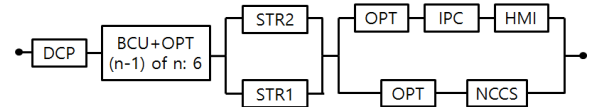
그림 4는 상기 3가지 변전소 자동화 구조에 대한 RBD를 나타낸다.

#### 4. 신뢰도의 정식화 및 사례연구

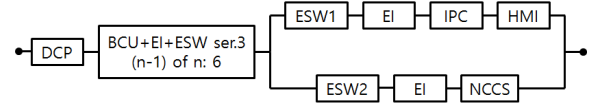
##### 4.1 RBD에 의한 신뢰도와 비 신뢰도

각 구성요소의 성공 가능성(probability of successful)을 R, 실패 가능성(probability of failure)을 Q이라고 할 때, 그림 4(a) 구조 1의 RBD에서, DCP:R<sub>1</sub>, BCU+OPT:R<sub>2</sub>, STR1:R<sub>3</sub>, STR2:R<sub>4</sub>, OPT:R<sub>5</sub>, IPC:R<sub>6</sub>, HMI:R<sub>7</sub>, NCCS:R<sub>8</sub> 라면, 그림 4(a)의 신뢰도는 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

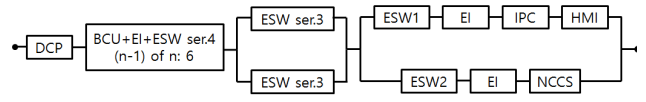
$$\begin{aligned} & DCP \cdot (BCU+OPT) \cdot [1-(1-STR_1)(1-STR_2)] \\ & \cdot [1-(1-OPT \cdot IPC \cdot HMI)(1-OPT \cdot NCCS)] \\ & = R_1 \cdot R_2 \cdot [1-(1-R_3)(1-R_4)] \cdot [1-(1-R_5R_6R_7)(1-R_5R_8)] \end{aligned} \quad (9)$$



(a) 구조 1



(b) 구조 2



(c) 구조 3

그림 4 신뢰도 블록도

Fig. 4 Reliability block diagram

그림 4(a)의 신뢰도 R<sub>11</sub>은 식 (10)과 표현될 수 있다.

$$R_{11} = R_1 \cdot R_2 \cdot [1-(1-R_3)(1-R_4)] \cdot [1-(1-R_5R_6R_7)(1-R_5R_8)] \quad (10)$$

여기서, R<sub>9</sub> = R<sub>5</sub>R<sub>6</sub>R<sub>7</sub>, R<sub>10</sub> = R<sub>5</sub>R<sub>8</sub> 이다.

그림 4(a) 구조 1에서 각각의 신뢰도 R<sub>n</sub>을 0.9라고 한다면 시스템의 신뢰도(성공 가능성)와 비 신뢰도(실패 가능성) Q<sub>n</sub>은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{11} &= 0.9^2 \cdot (1.8-0.9^2) \cdot (1.8-0.9^2) = 0.793881 \\ Q_{11} &= 1-R_{11} = 1-0.793881 = 0.206119 \end{aligned}$$

그림 4(b) 구조 2의 RBD에서, DCP:R<sub>1</sub>, BCU+EI+ESW ser.3:R<sub>2</sub>, ESW1:R<sub>3</sub>, ESW2:R<sub>4</sub>, EI:R<sub>5</sub>, IPC:R<sub>6</sub>, HMI:R<sub>7</sub>, NCCS:R<sub>8</sub> 라면, 그림 4(b)의 신뢰도는 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} & DCP \cdot (BCU+EI+ESW_{ser.3}) \\ & \cdot [1-(1-ESW_1 \cdot EI \cdot IPC \cdot HMI)(1-ESW_2 \cdot EI \cdot NCCS)] \\ & = R_1 \cdot R_2 \cdot [1-(1-R_3R_5R_6R_7)(1-R_4R_5R_8)] \end{aligned} \quad (11)$$

그림 4(b)의 신뢰도 R<sub>11</sub>은 식 (12)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 \cdot R_2 \cdot [1-(1-R_3R_5R_6R_7)(1-R_4R_5R_8)] \\ &= R_1 \cdot R_2 \cdot (R_9 + R_{10} - R_9R_{10}) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, R<sub>9</sub> = R<sub>3</sub>R<sub>5</sub>R<sub>6</sub>R<sub>7</sub>, R<sub>10</sub> = R<sub>4</sub>R<sub>5</sub>R<sub>8</sub> 이다.

그림 4(b) 구조 2에서 각각의 신뢰도 R<sub>n</sub>을 0.9라고 한다면 시스템의 신뢰도와 비 신뢰도 Q<sub>n</sub>은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{11} = 0.9^2 \cdot (1.8 - 0.9^2) = 0.8019$$

$$Q_{11} = 1 - R_{11} = 1 - 0.8019 = 0.1981$$

그림 4(c) 구조 3의 RBD에서, DCP:R<sub>1</sub>, BCU+EI+ESW<sub>ser.4</sub>:R<sub>2</sub>, ESW<sub>ser.3</sub>:R<sub>3</sub>, ESW1:R<sub>4</sub>, ESW2:R<sub>5</sub>, EI:R<sub>6</sub>, IPC:R<sub>7</sub>, HMI:R<sub>8</sub>, NCCS:R<sub>9</sub> 라면, 그림 4(c)의 신뢰도는 식 (13) 과 표현될 수 있다.

$$DCP \cdot (BCU + EI + ESW_{ser.4}) \cdot [1 - (1 - ESW_{ser.3})(1 - ESW_{ser.3})] \cdot [1 - (1 - ESW_1 \cdot EI \cdot IPC \cdot HMI)(1 - ESW_2 \cdot EI \cdot NCCS)] = R_1 \cdot R_2 \cdot [1 - (1 - R_3)(1 - R_3)] \cdot [1 - (1 - R_4 R_6 R_7 R_8)(1 - R_5 R_6 R_9)] \quad (13)$$

그림 4(c)의 신뢰도는 R<sub>12</sub>로 식 (14)와 같이 표현될 수 있다.

$$R_{12} = R_1 \cdot R_2 \cdot [1 - (1 - R_3)(1 - R_3)] \cdot [1 - (1 - R_4 R_6 R_7 R_8)(1 - R_5 R_6 R_9)] = R_1 \cdot R_2 \cdot [1 - (1 - R_3)(1 - R_3)] \cdot [1 - (1 - R_{10})(1 - R_{11})] \quad (14)$$

여기서, R<sub>10</sub> = R<sub>4</sub>R<sub>6</sub>R<sub>7</sub>R<sub>8</sub>, R<sub>11</sub> = R<sub>5</sub>R<sub>6</sub>R<sub>9</sub> 이다.

그림 4(c) 구조 3에서 각각의 신뢰도 R<sub>n</sub>을 0.9라고 한다면 시스템의 신뢰도와 비 신뢰도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{12} = R_1 \cdot R_2 \cdot (2R_3 - R_3^2) \cdot (R_{10} + R_{11} - R_{10}R_{11}) = 0.9^2 \cdot (1.8 - 0.9^2) \cdot (1.8 - 0.9^2) = 0.793881$$

$$Q_{12} = 1 - R_{12} = 1 - 0.793881 = 0.206119$$

#### 4.2 사례 연구

표 1은 개별 신뢰도 가변에 따른 시스템의 신뢰도와 비 신뢰도를 나타낸다. 개별 신뢰도 값은 0.90에서 0.99까지 0.01간격으로 가변하였고 마지막은 0.999로 하였다.

표 1 시스템의 신뢰도와 비 신뢰도

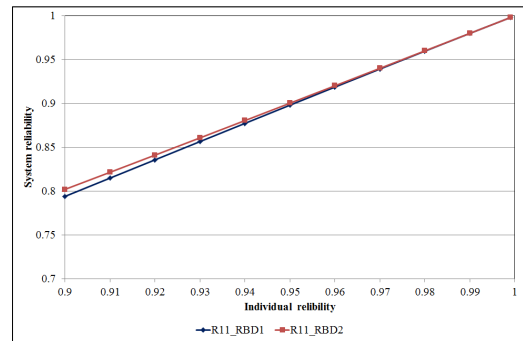
Table 1 Reliability and unreliability of system

RBD	구조 1		구조 2	
	R <sub>11</sub>	Q <sub>11</sub>	R <sub>11</sub>	Q <sub>11</sub>
0.90	0.793881	0.206119	0.801900	0.198100
0.91	0.814739	0.185261	0.821392	0.178608
0.92	0.835601	0.164399	0.840983	0.159017
0.93	0.856445	0.143555	0.860662	0.139338
0.94	0.87725	0.12275	0.880419	0.119581
0.95	0.897993	0.102007	0.900244	0.099756
0.96	0.918653	0.081347	0.920125	0.079875
0.97	0.939207	0.060793	0.940053	0.059947
0.98	0.959632	0.040368	0.960016	0.039984
0.99	0.979904	0.020096	0.980002	0.019998
0.999	0.997999	0.002001	0.998000	0.002000

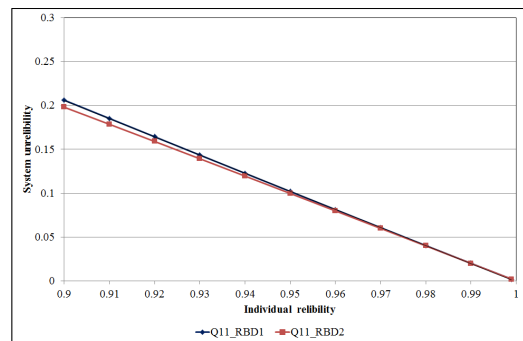
표 1로부터 개별 신뢰도가 0.90인 경우, 구조 1의 R<sub>11</sub>은 0.793881 이었고, 구조 2의 R<sub>11</sub>은 0.801900 이었다.

전반적으로 구조 2(decentralized ring coupler)가 구조 1(double-star coupler)보다 신뢰도가 좋았으며, 구조 1의 비 신뢰도가 구조 2의 비 신뢰도보다 낮음을 알 수 있었다.

그림 5는 전체 시스템의 신뢰도와 비 신뢰도의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 5(a)로부터 시스템 신뢰도는 개별 신뢰도가 작은 경우, 개별 신뢰도가 점점 커질수록 두 시스템 신뢰도 차이가 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 그림 5(b)로부터 시스템 비 신뢰도는 개별 신뢰도가 작은 경우, 개별 신뢰도가 점점 커질수록 두 시스템의 비 신뢰도 차이가 점점 감소하는 것을 알 수 있었다.



(a) 신뢰도



(b) 비 신뢰도

그림 5 시스템의 신뢰도와 비 신뢰도의 결과

Fig. 5 Result of reliability and unreliability of system

#### 5. 결론

최근 구축되고 있는 변전소 자동화 시스템의 신뢰성을 평가 한 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 3가지 자동화 디지털 변전소 구조의 가용성을 검토하기 위하여 신뢰도 블록도를 제안하였다. 3가지 형태의 자동화 디지털 변전소에 대하여 네트워크 측면의 구성요소에 관한 신뢰도를 정식화하였다. 또한, 가정한 개별 신뢰도와 개별 비 신뢰도의 변화에 따른 전체 시스템의 신뢰도와 비 신뢰도를 평가하였다. 시뮬레이션 결과 decentralized ring coupler 구조의 자동화 디지털 변전소가 double-star coupler 구조의 자동화 디지털 변전소보다 신뢰도가 좋은 것으로 나타났다.

## References

- [1] J. Endrenyi, "Three-State Models in Power System Reliability Evaluation", IEEE Trans. on PAS, Vol. 90, No. 4, pp. 1909~1916, July 1971.
- [2] Gwang-Won Kim, "A Study on the Substation Reliability Assessment Using Weibull Distribution", Trans. KIEE, Vol. 51A, No. 1, pp. 7~14, JAN., 2002.
- [3] S.H. Lee, J.O. Kim, S.T. Cha, T.K. Kim, J.B. Choo, "A Study on Optimal Modeling for the Reliability Evaluation of KEPCO Systems", 2004 KIEE Summer Conference, pp. 177~179, July 2004.
- [4] Y.H. Lee, D.H. Baek, S.H. Jang, "Reliability analysis for substation based on the failure rate data the facilities", 2006 KIEE Summer Conference, pp. 29~31, July 2006.
- [5] J.F. Moon, J.G. Shon, "Reliability Evaluation of Power Distribution System Considering Maintenance Effects", Trans. KIEE, Vol. 51A, No. 1, pp. 7~14, JUN., 2010.
- [6] J.K. Kim, Y.H. Ahn et. al., "IED(Intelligent Electronic Device) Development", MOTIE Technology Development Final Report, pp. 1~941, September 2011.
- [7] Chul-Won Park, "Digital Plans to Establish of Conventional 154kV S/S, 2015 KEPCO Report, pp. 1~94, 2015. 10.
- [8] J.Y. Han, Y.H. An, Y.H. Kim, B.H. Kim, "Establishment of Intelligent Substation Automation System for Improving Electronic Power System Reliability", KIEE CICS'10, pp. 179~180, April 2010.
- [9] Seok-kon Kim, Yong-ho An, Byung-tae Jang, Nam-ho Lee, Jeong-yeol Han, You-jin Lee, "Future Plans on the Design and Structures of the Topology for Process Bus System in Digital", ISGC 2015, SPGO-330, 2015. 10.
- [10] H.J. Lee, E.J. Lee, "A Study on Intelligent Alarm Processing of 765kV Substation", KIEE Summer Conference, pp. 284~285, July 2009.
- [11] Dou Renhui, Yu Jing, Lu Jianfeng, "Modification of In-Service Substation based on IEC 61850", Springer-Verlag London Limited, pp. 1~5, 2012.
- [12] Ji Zhang, Zhi Du, Yong Cai, Jiong Yan, Yanbo Chen, Qiaoping Kang, Shouxia Jiang, "Analysis of Technology and Economy of New Generation Smart Substation", 978-1-4673-8040-9/15/\$31.00, IEEE PES General Meeting, July 2015.
- [13] Xi Chen, Hao Guo, Peter Crossley, "Performance Testing of IEC 61850 Based Architecture for UK National Grid Standardised Substation Automation Solutions", 978-1-4673-8040-9/15/\$31.00 IEEE PES General Meeting, July 2015.
- [14] Hamze Hajian-Hoseinabadi, "Availability Comparison of Various Power Substation Automation Architectures", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 28, No. 2, pp. 566~574, APRIL 2013.
- [15] Hamze Hajian-Hoseinabadi, "Reliability and component importance analysis of substation automation systems", Int. J. Electrical Power and Energy Systems, pp. 445~463, 2013.
- [16] Roy Billinton, Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems, Concepts and Techniques", 2nd ed. New York : Plenum, pp. 80~100, 1992.
- [17] J.S. Choi, "Engineering of Power System Reliability", Gyeongsang National University Press, pp. 1~481, 2012. 8.
- [18] Y.Y. Park, J.Y. Lee, C.W. Park, "A Study on Reliability of Substation", 2015 KIEE PES Autumn Conference, pp. 438~439, 2015. 10.

---

 저 자 소 개

**박철원 (朴哲元)**

1961년 8월 13일생. 1988년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1996년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1989년~1993년 금성산전연구소 주임연구원, 1993년~1996년 프로컴시스템 기술연구소 선임연구원, 1993년~1997년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 강사, 1997년~2007년 국립강릉원주대학교 전기공학과 전임강사, 조교수, 부교수, 2007년~현재 국립강릉원주대학교 전기공학과 정교수, 2011년~현재 대한전기학회 전력기술부문회 이사, 2012년~2014년 대한전기학회 논문지 P권 편집위원장.  
E-mail : cwpark1@gwnu.ac.kr