

WAMAC 시스템 적용을 위한 PMU 위치 선정에 관한 연구

윤부현*, 구본우, 김상권, 신용두
한국전력공사, 송변전전략실

Study of PMU installation location for applying WAMAC system

Boo-Hyun Yun*, Bon-woo Koo, Sang-Kwon Kim, Yong-Doo Shin
KEPCO Transmission Strategy Office

Abstract - 본 논문은 수도권 전압안정도 향상을 위해 사용될 Synchro-Phasor에 대하여 그 최적 설치위치에 관하여 다루었다. 특히 WAMAC(Wide Area Monitoring And Control system)시스템 구축을 위해 국내 계통 전체 감시목적과 수도권 전압 안정도 향상이라는 두 가지 측면에서 최적 PMU 설치 위치에 대해 검토하고 그 안을 제시하였다.

1. 서 론

최근 과거에 비해 전력계통이 복잡해지고, 다양한 설비들이 계통에 연결되면서 계통의 안정도를 저해하는 요소들이 증가하고 있다. 따라서 기존의 SCADA데이터 만으로는 계통운영에 한계가 있으며, 특히 북상선 로고장과 같이 치명적인 고장에 대해 신속, 정확하고 효율적인 대응을 위한 시스템 구축의 필요성이 대두되었다. 이에 한전 전력연구원에서는 WAMAC 시스템 구축에 대한 연구를 진행하고 있다.

WAMAC시스템은 Synchro-Phasor(이하 PMU, Phasor Measurement Unit)라는 시각동기화 된 보다 정밀한 계측장비를 이용하여 수도권 SPS(Special Protection Scheme)를 구현한다는데 기존의 그것과 차이가 있다. 이를 통해 고장에 보다 신속하고 정확한 대응이 가능해지며 나아가 고장을 미연에 방지하는 것을 목표로 한다. 또한 기존 SPS에서 산정한 부하차단양을 재검토하여 최소한의 부하차단이 가능해진다. 이러한 WAMAC시스템 구축을 위해 PMU는 반드시 필요하지만 아직까지는 고가의 장비이기 때문에 모든 모선에 PMU를 설치할 수 없는 상황이다. 본 논문에서는 이러한 한정된 수량(20기)의 PMU를 고려하여 그 최적의 위치를 선정하고자 한다.

2. PMU 위치 선정 알고리즘

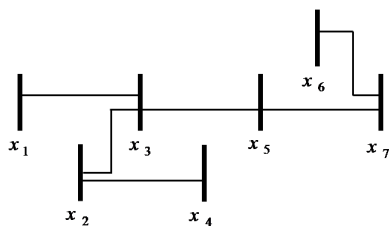
2.1 감시 목적

PMU는 기본적으로 PMU가 설치된 모선의 전압과 모선에 연결된 전류를 최대 60sample/sec로 측정한다. 따라서 계통 토폴로지에 관한 정보를 알고 있다면 키르히호프의 법칙을 이용하여 1-level 인근 모선의 전압, 전류 역시 알 수 있게 된다. 여기서 PMU에 의해 직접 측정되는 모선을 directly observed, 계산에 의해 알 수 있는, 1-level 인근 모선을 observed 모선 이라고 한다. 따라서 모든 모선에 PMU를 설치하지 않더라도 그보다 적은수의 PMU로 상태추정 없이 모든 모선의 전압, 전류, 위상각을 알 수 있게 된다.

2.1.1 Linear Programming

앞서 언급한 원리에 의해 최소의 PMU 설치로 모든 모선의 정보를 얻기 위해서 LP(Linear Programming)방법을 이용한다[1]. LP는 목적함수, 제약식으로 구성되어 있으며, 본 절에서는 계통의 모든 모선이 observed된 상태를 만족시키는 제약식과 설치되는 최소의 PMU개수를 목적함수로 한다.

우선 n개의 모선으로 구성된 계통에서 $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ 과 같이 PMU index를 도입한다. 설치된 모선은 1의 값을, 그렇지 않은 모선은 0의 값을 갖는다. 그림1은 7모선의 예시 계통을 나타낸다.



<그림 1> 7모선 예시

만일, 1번 모선에 PMU가 설치되어 있다면, 3번 모선은 observed 되며, 7번 모선에 PMU가 설치되어 있다면 5, 6번 모선이 observed 된다. 즉, 인접한 모선사이에는 1기의 PMU만 설치되어도 인근 모든 모선이 observed 되므로 이를 제약식으로 표현한다면 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 또한 각 모선에 설치되는 PMU개수를 최소화 하는 목적함수는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$x_1 + x_3 \geq 1 \tag{1}$$

$$x_2 + x_3 + x_4 \geq 1$$

$$x_3 + x_1 + x_2 + x_5 \geq 1$$

$$x_4 + x_2 \geq 1$$

$$x_5 + x_3 + x_7 \geq 1$$

$$x_6 + x_7 \geq 1$$

$$x_7 + x_5 + x_6 \geq 1$$

$$Z = \min(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7) \tag{2}$$

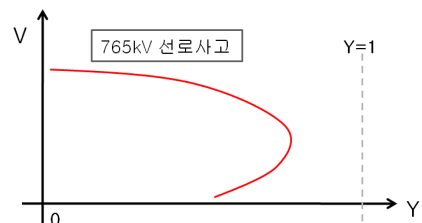
이러한 제약식과 목적함수를 이용하여 LP방법으로 해(모선별 PMU index)를 구하면 감시 목적을 위한 최소의 PMU개수와 그 설치 위치를 구할 수 있다. 본 논문에서는 LP방법에 대한 자세한 내용은 생략하겠다.

2.2 제어 목적

제어목적은 감시목적과 다르게 PMU설치 기준을 안정도 향상으로 한다. 따라서 관심 제어지역을 선정하고, 해당 지역과 밀접한 관계가 있는 모선에서의 정밀한 데이터 취득을 위해 해당 지역에 PMU를 설치하게 된다. 제어 목적에 의한 설치 위치 선정 기법으로는 YV 기법(선로정수 연속조류계산)에 의한 민감도 지수와 특정 고장에 대한 nose point에서의 모선 전압변화를 등이 있다.

2.2.1 선로정수 연속 조류계산

WAMAC시스템에서 고려하는 신서산-신안성 765kV 루트고장이 발생하는 경우 조류계산은 수행하지 않는다. 조류계산이 수행하지 않는 경우 계통검토를 수행할 수 없으므로, 선로 어드미턴스Y를 파라미터화 하여 고장을 발생시켜가며, 조류계산이 수행하는 한계점을 찾아가는 YV기법을 적용 하였다. 여기서 파라미터 Y는 고장시 1, 고장전 0값을 갖게 되며 nose point에서의 Y가 1보다 작은값 이라면 이는 선로고장 발생 시 계통이 불안정함을 나타내고, 1보다 큰 값이라면 고장시에도 계통이 안정함을 나타낸다. 그림2는 YV기법의 개념도를 나타낸다.



<그림 2> YV기법 개념도

이처럼 YV분석을 통해 nose point에서의 민감도를 식(3)과 같이 계산할 수 있으며, 이를 통해 선로고장에 대해 가장 민감한(취약한) 모선을 판별할 수 있다.

$$participation\ factor = \frac{\partial Q_i}{\partial Y} \tag{3}$$

2.2.2 전압 변화율

고장에 대해 민감한 모선을 판별하는 또 다른 지표는 식(4)와 같이 nose point에서의 전압 변화율을 계산하는 것이다. 전압 변화율도 앞서 언급한 YV기법을 사용하며 그 원리는 동일하다.

$$\Delta V = \frac{V_{pre-outage} - V_{post-outage}}{V_{pre-outage}} \quad (4)$$

3. WAMAC 시스템 구축을 위한 PMU 위치 선정

3.1 사례연구

실제 계통에 WAMAC시스템을 적용하는데 있어서 향후 시스템의 확장성 등을 고려하여 2장에서 언급한 감시목적, 제어 목적을 종합적으로 판단해야 한다. 따라서 본 장에서는 각각의 목적에 따라 2011년 하계 peak 데이터에 대하여 검토하고 최종적으로 PMU 설치 위치 선정 안을 제시하고자 한다.

3.1.1 계통 감시를 위한 LP분석

현재 수도권 계통에 대하여 주요 북상선로6개는 계통의 안정도를 판단하는데 있어서 중요한 요소이다. 따라서 향후 확장성이나 또 다른 적용 요소를 고려하여 북상선로 수전단 6개 모선에 반드시 PMU설치를 가정하는 제약조건과 수도권 345kV 이상의 모선에 대해 Fully observability를 만족시키는 것을 목적으로 하여 LP분석을 수행하였다. 표1은 그 결과를 나타내며, 총 19개의 PMU가 필요한 것으로 분석되었다.

<표 1> 수도권 345kV 전체 모선 감시를 위한 PMU설치 개소 (용통선로 수전단 6기 설치 가정)

모선 번호	모선이름	모선 번호	모선이름	모선 번호	모선이름
1200	신가평3	3850	포스코CC3	4700	신용인3
1350	신덕은3	4100	신안성3	4750	곤지암3
1400	양주3	4300	서안성3	2500 1	동서울SVC
1700	미금3	4400	화성3	1401	양주3S
2600	영등포3	4402	화성3S	3300	신김포3
3350	서인천C3	4501	신성남3S		
3600	신시흥3	4600	서서울		

3.1.2 YV 민감도 분석

YV기법을 사용하여 2011년 하계 peak데이터에 대하여 검토하였다. 표2는 모의 결과 상위10개 모선을 나타낸다.

<표 2> YV민감도에 대한 상위10개 모선(345kV이상)

YV 민감도			
순위	모선번호	모선이름	PF
1	6950	아산3	0.0065
2	4250	신당정3	0.0058
3	6151	보령TP#2	0.0057
4	4850	신온양	0.0056
5	4400	화성3	0.0056
6	6800	청양3	0.0055
7	6850	보령TP#3	0.0055
8	4600	서서울3	0.0048
9	6700	신계룡3	0.0041
10	6300	신서산3	0.0037

3.1.3 YV 전압변화율 분석

앞 절과 동일하게 YV기법을 사용하여 전압 변화율에 대하여 모의하였다. 표3은 전압변화율이 큰 상위 10개 모선에 대한 결과이다.

<표 3> YV전압변화율에 대한 상위10개 모선(345kV이상)

YV 전압변화율			
순위	모선번호	모선이름	전압변화율 [%]
1	6950	아산3	14.57
2	4400	화성3	13.60
3	4250	신당정3	12.43
4	4402	화성M1	12.41
5	4850	신온양	12.13
6	4600	서서울3	12.07
7	2401	영서3S	10.19
8	6700	신계룡3	10.14
9	2600	영등포3	9.95
10	2400	영서3	9.88

4. 결 론

3장에서 다른 각각의 사례연구를 종합하여 총20기의 제한된 PMU를 이용하여 설치 안을 표4에 나타내었다. 본 논문에서 제시한 WAMAC시스템 적용을 위한 PMU 위치 선정안은 2011년 하계 peak데이터를 사용한 검토 결과이다. 2012년에 실제로 PMU를 설치하기 전에 다양한 계통에 대한 모의가 수반되어야 하며, 실무부서의 요구사항 등을 반영하여 추가적인 검토가 필요할 것이다.

<표 4> PMU설치 개소(안)

※청색 표시된 모선은 중복된 모선으로 제외

고려대상	대상변전소	설치기수
기 설치 개소	동서울(2), 아산(2), 청양, 신계천	6
중앙집중형 시스템	아산, 화성, 신온양, 서서울, 청양, 신진천, 신안성, 서안성, 신수원, 신양재, 신용인	8
용통선로 (수전단)	화성, 서서울, 서안성, 신안성, 곤지암, 신가평	2
수도권 감시	신덕은, 신김포, 양주, 양주3S, 서인천, 영서, 신시흥, 화성, 미금, 동서울, 신성남, 신용인, 신안성, 포스코	8
기타	인천화력, 신원154kV	2

[참 고 문 헌]

[1] Reynaldo F.Nuqui, Arun G.Phadke, "Phasor Measurement Unit Placement Techniques for Complete and Incomplete Observability", IEEE Trans. On Power Systems, Vol20, 2381-2388, 2005
 [2] V.Ajjarapu, C.Christy, "The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis", IEEE Trans. On Power Systems, Vol PWRS-7, 1992