

EMS 실시간 무효전력 최적화 기능 소개 및 활용 방안

강부일 조종만 신용선
한국전력거래소

Presentation of EMS Real-Time VOLTAGE-VAR-DISPATCH Function & Practical Operating Plan

Bu-Il Kang, Jong-Man Cho Yong-Son Shin
KPX (Korea Power Exchange)

Abstract - With the benefit of telecommunication and IT technologies, Real-time Power system analysis having been gradually progressed. The power system become more complex due to the gradual increment of power demand. We analyze the problems in power system operation, by the use of PSS/E(power flow, fault and transient stability study) and VSAT for voltage stability. The results of establishment of power system operating plan and countermeasure are described.

통신 및 IT 기술의 발달로 실시간 기반 전력계통 해석 기능은 점진적으로 발전하고 있으며, 우리나라도 2003년부터 상태추정, 상정고장 등 실시간 해석기반 계통해석을 수행하고 있다. Network Analysis(NA) 기능으로 언급되는 EMS 계통해석 기능은 실시간 전력계통의 안전도를 평가, 취약개소를 도출함으로써 비상시 신속하고 안정적인 계통운영에 활용되고 있다. 본 논문에서는 EMS NA 기능 중 실시간 무효전력 최적화 제어기능인 VVD(Voltage VAR Dispatch) 기능을 소개하고 이의 활용방안을 제시하고자 한다.

1. 서 론

최적조류계산(OPF) 기능의 목적은 전력계통 상태를 향상시키기 위한 각종 제어요소들에 대한 권고치를 결정하는 것이다. 즉, 전력계통 한계값 위반을 해소하거나 완화하는 조치, MW 손실, 연료비 또는 각종 비용함수 들을 최소화 하기 위한 제어요소들의 움직임을 계산하는 것이다. 이러한 최적화의 첫 번째 기능은 전압한계값, 송전선로 조류한계값 등과 같은 사전 정의된 한계값 이내에서 계통변수들을 움직이도록 하는 것이고, 두 번째 기능은 이러한 영역내에서 사용자가 정의한 목적함수를 최적화 하는 것이다.

EMS 최적화 기능은 실시간모드(Real-Time Mode) 또는 검토 모드(Study Mode) 로 구성되어 있으며 실시간모드에는 정상상태 과부하 해소를 위한 RTSENH 와 전압 위반 및 무효전력 손실 최소화를 위한 VVD 가 있다. 검토모드에서는 이러한 두 기능을 통합, 운영할 수 있도록 OPF 기능을 제공하고 있다. VVD 는 OPF 와 동일한 알고리즘을 채택하고 있다.

2. 본 론

1. EMS OPF Algorithm

기본적으로 EMS 최적조류계산(OPF) 은 Newton's Method 로 알려진 기법을 사용하고 있다. Newton OPF Algorithm 은 등호 제약 및 부등호제약의 세트를 만족하는 비선형 목적함수의 최소치 또는 최대치를 찾는 것이다. Newton's Method 는 다음의 3 가지 특성을 갖는다.

- 모든 선택된 제어요소들을 동시에 움직인다.
- 계통상태를 동시에 계산한다.
- 모든 등호 또는 부등호제약을 동시에 인가한다.

1.1 Newton's Method

내부적으로 Newton OPF 와 Newton Powerflow 와의 차이는 Newton OPF 가 조류계산의 거의 2배 정도의 차수를 갖는 행렬식을 계산한다는 것이며, 조류계산에서의 Jacobian matrix 에 대비해서 Hessian 이라고 불린다.

$$W \cdot z = -g$$

- W : Hessian Matrix
- z : Output Vector(Control and State Variables)
- g : Input Vector(Lagrangian Vector 의 Gradient)

OPF 방정식과 Powerflow 방정식을 비교해 보면 W 는 Jacobian 과 유사하고 z 는 Lagrangian multipliers 와 모든 상태 및 제어변수들을 포함하며 g 는 조류계산 방정식에서 사용되는 Mismatch Vector 와 유사하다.

만약 제어요소를 문제화 하지 않는다면 사실 OPF 는 Newton 조류계산으로 단순화 할 수 있을 것이다. OPF 기능의 목적은 전력계통 상태를 향상시키기 위한 각종 제어요소들에 대한 권고치를 결정하는 것이다. 즉, 전력계통 한계값 위반을 해소하거나 완화하는 조치, MW 손실, 연료비 또는 각종 비용함수 들을 최소화 하기 위한 제어요소들의 움직임을 계산하는 것이다. 이러한 최적화의 첫 번째 기능은 전압한계값, 송전선로 조류한계값 등과 같은 사전 정의된 구간내로 계통변수들을 움직이게 하는 것이고 두 번째 기능은 이 구간내에서 사전 정의된 목적함수를 최적화 하는 것이다. 그 결과 Tolerance 이내의 모션불일치와 z(Solution Variable Updates)≒0을 만족할 경우 수렴된 것으로 판정하게 된다. 한편 Newton OPF 는 무효전력 제어장치를 조정하여 유효전력 손실을 최소화 할 수 있고, 유효전력 제어장치를 조정해서 연료비를 최소화 할 수 있다. 또한 목적함수를 계산하기 위해 유효 및 무효전력 제어장치를 동시에 조정할 수도 있다.

2. EMS 최적화 개요

2.1 최적화 문제 정의 : 최적화 범주는 경제급전, 제약유효전력급전계획, 제약무효전력급전계획으로 구분되며 최적화 문제 정의는 아래 4가지 카테고리로 나눌수 있다.

2.1.1 Network : Network 모델은 EMS Genesys 에 의해 만들어지고 Netmodel 에 저장되며 모든 Network 기능에 공통적으로 사용된다. Network 모델에 포함되는 데이터는 아래와 같다.

- 전력계통의 전기적 접속관계
- 송전선로 임피던스 등과 같은 전기적 모델
- 부하모델 및 스케줄
- 감시그룹 및 한계값
- 제어요소에 대한 증감발출
- 발전기 무효전력 특성곡선

2.1.2 Control Model : Control Model 은 전력계통에서 제어가능한 설비로서 Network Model 에서 모델링된 제어가능한 구성요소의 사용자에게 의해 사전 정의된 세트들이다. 이러한 제어요소들은 최적화 기능에서 활성화 또는 비활성화 될 수 있다. 사용자는 아래의 모델들에 대해 제어변수로서 정의할 수 있다. 아울러 개별 제어요소들을 그룹화하여 편의성을 높이기도 하고 있다.

- 발전기 유효출력
- 발전기 무효출력
- 변압기 탭
- 조상설비

2.1.3 Objective Function Model

- 발전기 연료비 최소화 : 발전기 유효출력 또는/및 무효출력에 대한 연료비를 최소화 하는 기능
- MW 손실 최소화 : 무효전력 제어장치를 사용하여 MW 손실을 최소화하는 기능으로 제어요소가 비용곡선에 할당되지 않을 경우 최적화기능은 기본적으로 MW 손실 최소화를 계산한다.
- 무효전력 예비력 최대화 : 상정고장에 대비하여 요구되는 무효전력 예비력에 대해 발전기 비용곡선을 추가함으로써 최적화 계산 수행

2.1.4 Constraint Model : 기본적으로 Network Model 에서 정의된 물리적 제약들과 아래에 설명되는 운전제약이 해당된다.

- 등호제약 : 전력평형방정식이 해당되며 조류계산과 차이는 최적화에서는 발전기 출력을 제어요소로 정의해야 한다는 점이다.
- 부등호제약 : 등호제약이 어떤 특정값에 해당한다면 부등호 제약은 값의 범위에 해당된다고 할 수 있다. 즉 변수 또는 함수가 정의된 범위 이내에서 자유롭게 허용될 수 있다는 것이다. 아래와 같은 부등호제약 유형이 최적화계산에 포함된다.
 - 발전기 유,무효출력 한계값
 - 모선 전압크기
 - AC 송전선로 및 변압기 조류 등

3. 실행제어

EMS Network Online Sequence 에서 VVD Flag 를 ON 하여 실행한다. 매 5분 주기로 실행되는 상태추정 결과에 따라 VVD 는 사전에 정의된 전압 범위 내에서 Feasibility 를 만족시키며 MW 손실을 최소화시킨다.

EMS 실시간 모드 계통해석 기능은 상태추정, 손실민감도 계산, 상정고장해석, 제약급전 및 무효전력 및 전압제어 기능을 구비하며 Flag 상태에 따라 Network Online Sequence 정의에 따라 순차적으로 수행된다.

4. 실행결과분석

4.1 VVD 계산결과 제어권고치

VVD 는 최종계산 결과 Feasibility 와 Economics 를 만족하는 결과를 아래와 같은 탭 또는 조상설비 제어를 통해 보여준다.

Voltage/VAR Control						VVD REALTIME VALID SOLUTION
Station	Type	Device Name	KV level	Base Value	Recommended Setpoint	
HWS	LTCTAP	GCMT1.P	345	9	10 TAP	
HWS	LTCTAP	GCMT2.P	345	9	10 TAP	
GRO	LTCTAP	GCMT2.P	345	7	8 TAP	
GRO	LTCTAP	GCMT3.P	345	7	8 TAP	
GRO	LTCTAP	GCMT4.P	345	7	8 TAP	
GNS	LTCTAP	GCMT1.P	345	5	6 TAP	
GNS	LTCTAP	GCMT2.P	345	6	7 TAP	
GNS	LTCTAP	GCMT3.P	345	6	7 TAP	
ERY	LTCTAP	GCMT2.P	345	7	8 TAP	
EJB	LTCTAP	GCMT3.P	345	6	7 TAP	
EJB	LTCTAP	GCMT4.P	345	6	5 TAP	
DSU	LTCTAP	GCMT1.P	345	10	9 TAP	
DSU	LTCTAP	GCMT2.P	345	10	9 TAP	
DHE	LTCTAP	GCMT1.P	345	7	8 TAP	
DHE	LTCTAP	GCMT2.P	345	8	9 TAP	
DHE	LTCTAP	GCMT3.P	345	8	7 TAP	

4.2 VVD 효과분석

상태추정 결과와 VVD 에 의한 전압 및 무효전력 제어 후 손실비교를 통해 효과를 분석할 수 있다. 기준이 되는 해석물은 EMS NA 조류계산 기능을 통해 분석하였다. 분석결과 MW 손실이 약 8MW 정도 줄어들었음을 확인할 수 있었다.

- 상태추정 결과를 조류계산 기능을 활용하여 계산한 결과

Network Area and Company Summary												
STUDY POWER FLOW												
Company Summary												
Company Division	Generation MW	MVAR	Load MW	MVAR	AUXLoad MW	MVAR	Interchange MW	MVAR	Losses MW	MVAR	Cap. MVAR	Reac. MVAR
KPX	43856	9420	43254	11596	73	979	0	1	601	134	7249	4938
CJ	233	6	306	71	1	2	74	31	1	-34	87	26
CW	5496	1199	2736	960	0	200	2698	285	62	933	409	0
DG	7512	1224	5502	1702	13	138	1937	53	73	872	1297	0
DJ	9871	2762	4188	1275	0	249	5538	266	145	1848	720	625
JC	526	85	3048	854	0	30	2604	4	82	-329	850	412
KJ	6837	1275	3120	876	59	123	3645	430	72	1331	502	0
NS	286	89	4399	775	0	3	4139	873	25	-1974	30	445
PS	5416	1514	5525	1346	0	95	138	419	29	-788	535	1071
SU	579	146	4441	1016	0	8	3895	24	34	-1354	477	937
SW	2684	250	5164	1496	0	76	2532	842	52	648	1461	408
JJ	37	5	1633	444	0	0	1613	309	17	-33	715	0
IC	4379	863	3193	781	0	56	1178	224	8	-986	167	1011

- VVD 결과를 조류계산 기능을 활용하여 계산한 결과

Network Area and Company Summary												
STUDY POWER FLOW												
Company Summary												
Company Division	Generation MW	MVAR	Load MW	MVAR	AUXLoad MW	MVAR	Interchange MW	MVAR	Losses MW	MVAR	Cap. MVAR	Reac. MVAR
KPX	43847	7997	43254	11596	73	979	1	1	593	-270	8290	4963
CJ	233	7	306	71	1	2	74	31	1	-34	87	26
CW	5496	967	2736	960	0	200	2699	184	61	883	692	0
DG	7512	1126	5502	1702	13	138	1938	59	72	842	1358	0
DJ	9869	2415	4188	1275	0	249	5538	142	144	1776	1122	628
JC	526	43	3048	854	0	30	2603	11	81	-362	852	413
KJ	6835	1073	3120	876	59	123	3644	423	71	1299	680	0
NS	286	55	4399	775	0	3	4138	873	25	-2010	31	448
PS	5414	1302	5525	1346	0	95	138	314	28	-827	603	1073
SU	579	100	4441	1016	0	8	3895	6	34	-1390	481	948
SW	2683	140	5164	1496	0	76	2532	867	52	597	1499	413
JJ	37	3	1633	444	0	0	1613	316	17	-40	717	0
IC	4376	766	3193	781	0	56	1175	145	8	-1004	169	1013

3. 결론

전력계통 운영 업무에 최적화 기능을 활용하는 사례는 극히 드물며 특히 실시간 계통운영에 최적화 기능은 그 활용사례가 거의 전무하다고 할 것이다. 더군다나 무효전력 및 전압 최적화 문제는 상당히 난해한 문제로 전 세계적으로 그 운영실적을 찾아 보기가 어려운 실정이다. 하지만 무효전력 관련 설비의 적정 제어를 통해 계통손실을 줄이고 순동무효전력을 추가 확보할 수 있다면 보다 효율적이고 안정적인 계통운영을 가능케 할 수 있을 것이다. 따라서 전력거래소는 이러한 목표달성을 위해 현재 실시간 전압 및 무효전력 최적화 기능을 분석, 그 활용방안을 강구 중이며 내년부터는 실계통 운영에 활용을 목표로 하고 있다.

[참고 문헌]

- [1] PTI, "PSSE 30.2 OPF MANUAL"2004
- [2] Alstom, "Optimal Powerflow Functional Specification",1999
- [3] Alstom, "Optimal Powerflow Operator's Guide",1999
- [4] Alstom, "Optimal Powerflow Display Reference",1999