

전압 변동률을 고려한 수도권 전압 안정화 다단계 부하차단 적용 방안

논문

58-12-6

Multi-level UnderVoltage Load Shedding Scheme Considering Rate of Change of Voltage for Voltage Stability

이 윤 환[†] · 김 태 균* · 김 지 훈* · 이 병 준** · 강 부 일*** · 조 종 만[§]

(Yunhwan Lee · Taegyun Kim · Jihun Kim · Byongjun Lee · Bu-il Kang · Jongman Cho)

Abstract - High technique growth of modern times and high industrial facility in consequence of buildings demand for electric power of an extensive scale with stability supply and maintenance of high quality. But, power system always have risk of network contingency. When power system break out disturbance, it circumstantially happen like uncontrolled loss of load developing from of cascading. Severely which would be raised wide area blackout, plan to prevent, which make stability through a little of load shedding and multi-level UnderVoltageLoadShdding should work. This paper presents target, sensitivity of bus voltage have choose appropriating load shedding location and load shedding decision making logic with considering rate of change of voltage have studied multi-level under voltage load shedding scheme. Calculation of rate of change of voltage applied method of least square. As a result, we are studied an dynamic analysis of 2008 summer peak data. We have been known that network analysis is a little development and developing UnderVoltageLoadShedding scheme.

Key Words : UnderVoltageLoadShedding, Rate of change of voltage, Delay time

1. 서 론

전력계통은 특성상 발전지점과 전력소비가 일치하지 않고, 산악지역이나 벽지에서 발전된 전기를 소비지인 도시로 송전선을 이용하여 송전하고 있는 실정으로 각 지역에 건설된 발전소간에는 네트워크가 구축되어 있다. 수도권 지역에 부하를 공급하기 위한 대단위 전력 수송 역할을 수행하고 있는 장거리 송전선로인 765kV 선로에 루트 사고가 발생하게 되면 전원설비가 상대적으로 부족한 수도권 지역에 저전압현상이 발생하여 광역정전과 같은 심각한 문제가 발생하게 된다. 이는 계통에 심각한 사고가 발생하여 다양한 요인들에 의하여 부하가 집중 되어있는 지역의 무효전력의 수급 불균형 현상을 야기하고 이에 따라 부하 집중지역의 전압이 큰 폭으로 떨어지는 현상을 해결하기 위한 대책 방안이 필요하다. 여러 가지 다양한 대책 방안들이 고려될 수 있는데, 다른 요인들에 의한 제어 가능성의 영향을 받을 수 없는 경우를 대비한 최종적인 대책 방안으로 부하를 탈락 시킴으로써 계통의 전압을 회복시킬 수 있는 저전압부하차단(UnderVoltageLoadShedding)방안이 필수적으로 고려되어야 한다. 저전압 부하차단은 변전소에서의 전압 수준을 저전압

계전기로 모니터링 하게 되는데, 일반적으로 입력되는 전압의 수준이 미리 정해 놓은 허용 전압 이하로 수 초 이상 내려가는 현상이 발생하면 저전압 계전기가 작동하여 부하 선로의 차단기를 T입력p시키게 된다. 부하 차단 후에 전압이 허용 전압으로 회복이 되면 추가적인 부하차단은 시행 되지 않는다. 하지만, 전압은 지역마다 다른 특성을 갖게 되는 특성으로 인하여 지역적으로 혹은 계통 전체에 무효전력의 수급 불일치 현상을 야기 하게 된다. 이런 현상으로 인하여 계통 전체나 지역적으로 불안정 현상이 발생하여 전압 값이 서로 다르게 된다. 그러므로 저전압 부하차단의 경우 측정 위치에 따라 전압이 다르기 때문에 대상 지역에 따라 서로 다른 기준을 설정하여 계통을 운용 하게 된다.[8] 실제로 부하차단을 실행하기 위해서는 계통 전반에 대한 이해를 바탕으로 부하차단이 필요한 다양한 운영 시나리오를 구성하는 것이 중요하다. 이는 계통의 특성을 반영한 상정 고장을 통하여 알아볼 수 있으며, 또한 부하차단 뿐만 아니라 발전기 탈락, 용통조류 제약 선정 등 계통해석에 있어 정확한 안정 제약 조건을 찾는 데 도움이 될 수 있다. 본 논문에서는 수도권 지역의 전압특성을 고려하였고, 기존의 관찰모선으로 선정된 개소에 대해 무효전력 민감도 순위를 통하여 민감도가 높은 모선을 취약개소로 선정하는 새로운 방안을 제안하여 관찰모선을 선정하였다. 또한, 다단계 부하차단 의사결정 방안으로 저전압 유지시간, 저전압 적분 값, 전압 변동률을 고려하여 실제 한전 계통에 적용할 수 있는 방안들을 모색하였다. 다단계 부하차단으로 부하의 과도한 차단을 피할 수 있으며, 이 때 적절한 시간 간격의 선택은 효과적인 UVLS(UnderVoltageLoadShedding)방안에 필수적인 조건이다. 본 논문의 알고리즘은 하계 최대부하 계통을 통하여 검토하였다.

* 정 회 원 : 고려대학교 전기공학과 박사과정

** 시니어회원 : 고려대학교 전기공학과 교수

*** 정 회 원 : 한국전력거래소

§ 시니어회원 : 한국전력거래소

† 교신저자, 준회원 : 고려대학교 전기공학과 석사과정

E-mail : yunan2@korea.ac.kr

접수일자 : 2009년 8월 21일

최종완료 : 2009년 9월 7일

2. 본 론

전력계통의 무효전력 예비력이 한정적으로 제어되는 경우 계통은 전압 불안정 현상이 나타나게 된다. 전압붕괴현상을 방지하기 위해서는 부하차단으로 계통의 안정성을 유지하게 되는데 저전압 계전기를 이용하여 주요 변전소에서 계전기 수준에서 차단한다. 저전압부하차단에서 실행하기에 앞서 우선적으로 수행되어야 하는 사항은 사고의 심각성을 반영할 수 있는 감시야 하의 선정이다. 전소에는 조류계산의 수렴 여부로 계통을 해석하였는데, 장거리 송전선로인 765kV의 루트고장을 적용하게 되면 조류계산이 발산하여 전압안정하기 해석에 어려움으로 따르게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 해가 붕괴하기 직전에 최대한 존재하는 점을 찾아가는 연속 조류 계산 개념을 적용하는 YV 해석기법을 적용하였다.

2.1 YV 해석

YV 해석의 기본적인 원리는 부하를 하나의 독립적인 파라미터로 모델링하여 기본 전력 조류 방정식을 재구성하여 부하 파라미터의 변화에 따른 해의 경로를 추적하는 기법이다. 여기서 사용된 연속 알고리즘은 심각한 상정사고에 대하여 강건한 수렴 성능을 가지게 되어 전압불안정점(Critical Point)에서 기존의 전력조류 자코비안의 특이성(Singularity)으로 발생하게 되는 조류 해의 발산 문제를 해결 하는데 쓰이게 된다. 일반적인 연속조류 계산은 기본적인 조류 해로부터 다음에 구해지는 근사 값을 구하는 예측과정(Predictor)과 근사 값에서 도출되는 조류 해를 구하는 수정과정(Corrector)으로 구성된다. 예측 과정은 현재의 해에서 접선 벡터(Tangent vector)를 사용하여 다음해의 초기 값을 계산하는 과정이며, 수정 과정은 예측 과정에서의 결정된 다음해의 초기 값으로부터 조류 해를 구하는 과정이다. 이는 조류 해를 계산할 수 있다는 가정 하에서 연속 조류 계산이 수행 되는데, 만약 부하가 해를 갖지 않는 영역에 존재하게 되어 조류계산을 수행 할 수 없게 되는 경우에 적용하게 되는데, 상정사고 시에 선로 임피던스를 파라미터 화하여 계통의 조류계산을 수행한다. 이때, 선로 임피던스를 파라미터 화하여 국부적으로 파라미터 화된 연속 법을 적용하여 선로 정수 연속조류계산이 사용된다.[9]

2.1.1 전력 조류 방정식의 재구성

상정사고 시에 선로정수의 임피던스 변화를 파라미터 화하여 전력 조류 방정식을 재구성 하게 된다. 수식 (1)은 i 모선의 전력 조류 방정식을 나타낸다.

$$0 = P_{Ti}(\delta, V) + P_{Gi} + P_{Lio} \tag{1}$$

$$0 = Q_{Ti}(\delta, V) + Q_{Gi} + Q_{Lio}$$

수식 (1)에서 쓰인 아래 첨자는 T는 선로주입, G는 발전, L은 부하를 각각 의미하게 된다. 벡터에 해당되는 δ 와 V 는 발전기 전압의 위상각과 크기를 나타낸다. 우선적으로

상정사고 해석을 수행 시에 선로를 선택하여 수식 (1)과 같은 전력 조류 방정식을 $g(x)=0$ 으로 표기 하였을 때, 그림 1과 같이 모선 i 와 j 에 연결된 선로를 π 형 등가회로로 가정한다. 그리고 선로 어드미턴스의 크기를 조절정식(을)과 파라미터(Y)를 도입하여 전력 조류 방정식을 선로 어드미턴스로 파라미터 화된 $g(x,y)=0$ 으로 재구성 한다. 송전선로의 직렬 어드미턴스와 병렬 어드미턴스에 (1-Y)를 곱하면, 선로정수 파라미터가 0 일 경우에는 정상 상태(Pre-Contingency)를 나타내고 선로정수 파라미터가 1 일 경우는 선로 어드미턴스 값이 0 으로 상정 사고 후(Post-Contingency)를 의미하게 된다.[9]

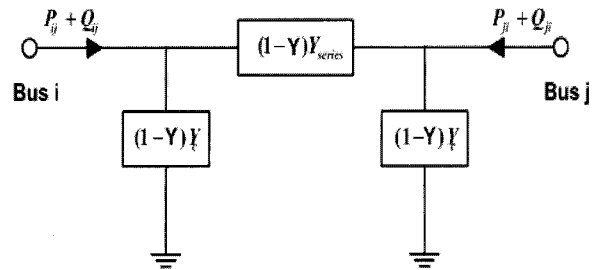


그림 1 상정사고 선로의 파라미터 화
Fig. 1 Parameterization of contingency line

그림 1에서, 선로의 직렬 어드미턴스와 병렬 어드미턴스가 파라미터(Y)에 영향을 받게 되어 모선 i 에서 파라미터(Y)가 도입된 전력조류 방정식으로 아래와 같이 수정 된다.

$$0 = |V_i|^2 G_{ii}^{\eta\omega} + |V_i| \sum_{\substack{l \in L(i) \\ l \neq j}} |V_l| [G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})] + |V_i| |V_j| [G_{ij}^{\eta\omega} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij}^{\eta\omega} \sin(\theta_{ij})] + P_{ij}(V_i, V_j, v) - P_i^{inj} \tag{2}$$

$$0 = |V_i|^2 B_{ii}^{\eta\omega} + |V_i| \sum_{\substack{l \in L(i) \\ l \neq j}} |V_l| [G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})] + |V_i| |V_j| [G_{ij}^{\eta\omega} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij}^{\eta\omega} \cos(\theta_{ij})] + Q_{ij}(V_i, V_j, v) - Q_i^{inj} \tag{3}$$

수식 (2), (3)에서 $L(i) = \{ l : |Y_{il}| \neq 0, l \neq i \}$ 로 정의하며, 모선 i 에 직접적으로 연결된 모선을 의미한다. 또한 상정사고 시 변화된 $Y_c/2$ 와 Y_{series} 값만큼의 차이를 계통 어드미턴스 행렬의 대각 요소 G_{ii}^{br} 와 B_{ii}^{br} 로 고려하였고, 비 대각 요소를 G_{ij}^{br} 와 B_{ij}^{br} 로 표현하여, 선로 (i - j) 를 통하여 모선 i에서 모선 j 로 나가는 조류 값은 아래식과 같다.

$$P_{ij}(V_i, V_j, v) = (1-v)\{|V_i|^2 G_{ii}^{br} + |V_i||V_j|[G_{ii}^{br} \cos(\theta_{ij}) + B_{ii}^{br} \sin(\theta_{ij})]\} \quad (4)$$

$$Q_{ij}(V_i, V_j, v) = (1-v)\{-|V_i|^2 B_{ii}^{br} + |V_i||V_j|[G_{ii}^{br} \sin(\theta_{ij}) - B_{ii}^{br} \cos(\theta_{ij})]\} \quad (5)$$

수정된 전력 조류 방정식은 계속하여 상태 변수 모선인 i , j 의 전압과 위상각에 영향을 받게 되며, 선로 정수 파라미터 Y 가 0 인 경우에는 정상상태를 의미하고, 선로 정수 파라미터 Y 가 1 인 경우에는 선로가 탈락된 상태를 의미한다. 선로 임피던스 변화 파라미터인 선로 정수 Y 를 포함 시켜 재구성된 전력 조류 방정식은 국부적으로 파라미터화된 연속 법을 적용하여, 정상상태에서 상정고장 사고까지의 조류해의 경로를 추적하게 된다.

2.1.2 확대 자코비안

선로 정수를 파라미터화하여 수정된 전력 조류 방정식을 연속 알고리즘에 적용 시킬 경우에 선로 정수 파라미터 v 를 상태 변수로 포함 시키게 되는 확대 자코비안이 사용 된다. 확대 자코비안은 선로 정수 연속 조류 계산의 예측 과정과 수정 과정에서 모두 사용 하게 되는데, 선로 정수 연속 조류 계산에 이용되는 n 모선 계통의 확대 자코비안 J_A 는 아래와 같이 나타낸다.[9]

$$J_A = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_T}{\partial \delta} & \frac{\partial P_T}{\partial V} & \frac{\partial P_T}{\partial v} \\ \frac{\partial Q_T}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_T}{\partial V} & \frac{\partial Q_T}{\partial v} \end{bmatrix}_{e_k} \quad (6)$$

$$P_T \in R^{n-1}, Q_T \in R^{n-npv-1}$$

여기에서 수식 (2) ~ (5)에서 표현 되어진 벡터 값인 PT는 유효전력 투입, QT는 무효전력 투입을 의미 한다. 확대 자코비안 J_A 의 e_k 는 k 번째 성분만이 1 이며 다른 성분들은 0 인 행 벡터에 해당된다. 또한, PT/n, QT/n, e_k 등은 기존의 전력 조류 자코비안에 추가 된 것이다. 기존 자코비안의 행과 열에 1줄씩 추가되어 전력 조류 자코비안이 특이성을 갖더라도 확대 자코비안은 특이성(singularity)을 극복 할 수 있어 선로 정수 연속 조류 계산으로 작성 된 Y-V 곡선 꼭지 점에서의 조류 해의 발산 문제를 해결 할 수 있다. 만약에 i 모선과 j 모선 사이에 선로 사고가 발생 했을 경우에 확대 자코비안의 마지막 열에 존재하는 성분들은 P_i, P_j 와 Q_i, Q_j 에 해당 되는 자코비안의 요소들만이 아래의 식과 같은 값을 갖게 되며, 이를 제외한 나머지 파라미터(Y)가 식에 포함 되지 않게 되어 0 이 된다.

$$\frac{\partial P_{Ti}}{\partial v} = -\{|V_i|^2 G_{ii}^{br} + |V_i||V_j|[G_{ii}^{br} \cos(\theta_{ij}) + B_{ii}^{br} \sin(\theta_{ij})]\} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_{Tj}}{\partial v} = -\{|V_j|^2 G_{jj}^{br} + |V_i||V_j|[G_{jj}^{br} \cos(\theta_{ij}) + B_{jj}^{br} \sin(\theta_{ij})]\} \quad (8)$$

위식은 i 모선의 경우에 해당되는 자코비안의 비영요소이고 j 모선에 해당되는 2개의 비영요소가 존재하여, 자코비안의 마지막 열의 비영요소는 합쳐서 4개가 된다. 즉, 자코비안 행렬에서 행 과 열 이 한 줄씩 추가 된다. 이때의 마지막 열은 i 모선에 해당되는 항 2개와, j 모선에 해당되는 항 2개만이 존재하게 되어 나머지는 0이 된다.

2.2. 저전압 부하차단 적용 방안

계통의 전압 불안정현상은 다양한 원인에 따라 발생하게 되는데, 이에 대응하는 UVLS 방안에도 여러 방식이 적용되고 있다. 현재 우리나라 채택하고 있는 중앙 집중형 방식은 원거리의 제어 개소에서 정보가 하나의 중앙 제어센터로 집중되어 UVLS(UnderVoltageLoadShedding)에 대한 의사결정을 수행하는 방식으로 원격 정보를 수집하고 동작을 개시하도록 하기 위한 통신 링크가 필요하다. 중앙 집중형 방식은 모든 지역의 정보를 반영 할 수 있으므로 의사결정의 판단이 정확하고, 타 지역의 차단 정보를 이용한 협조제어가 불필요 하여 빠른 제어 동작의 구현이 가능하며, 차단 부하량을 사전에 미리 선정하여 다단계로 구현 할 수 있으며 부하차단 외에 다른 제어 동작을 병행하여 시행 할 수 있는 장점이 있다. 반면 통신설비와 컴퓨터 등 필요한 하드웨어의 구현하여 많은 비용이 소비 되는 단점도 있다. 국내 계통의 부하차단은 신태백-신가평, 신안성-신서산 765kV 선로 2회선 고장으로 인한 심각한 고장이 발생하게 되는 경우 각각 해당 고장의 동서울345/서서울345 모선의 전압 값을 관찰하여 340kV 이하의 값으로 정해진 지연시간 이상으로 지속 시에 선택지역의 부하를 차단시켜 계통의 안정화를 꾀하고 있다. 345kV 모선의 전압을 감시하여 전압회복에 효과적으로 기인하는 차단 개소의 부하를 선정하여 모두 차단시키는 방식을 채택하고 있다. 추가적으로 저전압 부하차단을 해당 계통 내에서 다단계화 하는 방안을 고려 할 경우 차단 부하의 양을 감소시킬 수 있다. 또한 부하차단에 대한 의사결정방안 후에 부하차단만을 위한 통신라인을 구축하는 방안을 통하여 더 신속하게 제어를 수행 할 수 있다.[5],[10]

2.2.1 저전압 유지시간을 이용한 의사결정 방안

저전압 유지시간을 이용한 부하차단 시스템은 가장 간단한 형태의 UVLS 적용방안이다. 일반적으로 가장 많이 적용하고 있는 방안으로 주어진 로직에 최저 운전 전압을 설정하고 관찰 모선의 전압이 최저 운전 전압을 벗어날 경우 어느 정도의 지속시간을 설정하여, 이 두 가지 조건을 모두 만족시킬 때 부하차단을 수행하도록 하는 방식이다. 저전압 유지 시간은 Definite-time under Voltage load shedding scheme이라 명명하고 특정한 상황에서 부하차단을 동작 하도록 할 경우 사용 한다. 여러 개의 주어진 전압(set point)을 설정하여 더 많은 전압 강하에 더 짧은 지속시간을 부여 하여 보다 빠르게 부하를 차단하도록 설정하여 어느 정도는

보다 심각한 계통상황에서 보다 많은 부하를 차단하도록 설계하는 것이 가능하다. 또한 불필요한 부하차단을 방지하기 위해서 다단계로 부하를 차단하도록 설정하는 방안도 적용할 수 있다. 하지만, 단순히 전압 수준만을 관찰하여 부하를 차단하기 때문에 계통의 심각성을 세밀하게 반영하기는 어렵고, 계통의 급격한 변동에 따라 전압이 크게 oscillation 하는 경우 전압수준은 주어진 전압이하를 유지하지만 주어진 시간지연을 만족하지 않아 부하차단이 동작하지 않을 위험을 가진다.

2.2.2 저전압 적분값을 이용한 의사결정 방안

저전압 적분 값을 적용한 부하차단 의사결정 방안은 각 감시 모션에서 저전압 발생 시 전압 적분을 수행하여 계통의 위험 정도를 판단하는 방안이다. 계통의 전압이 기준 전압 이하로 감소 할 경우에 이를 적분한 적분 값을 적용하여 적분 값이 일정 수준 이상이면 부하차단을 수행하게 된다. 저전압 적분 값은 저전압 유지시간이 짧더라도 전압이 얼마나 크게 움직이는가에 따라 값이 결정되며 이를 통하여 계통의 심각한 상태를 정확하게 판단할 수 있다. 만약, 매우 심각한 상황이 발생하면 계통 전압은 심하게 oscillation 하기 때문에 저전압 유지시간이 짧아질 수 있다. 실제로 저전압 유지시간이 길다고 하여 계통이 심각한 상태라고 판단하기 어렵기 때문에, 이러한 단점을 보완하기 위하여 저전압 유지 시간에 따라 부하차단을 수행하고 저전압 적분 값을 이용하여 추가적인 부하차단을 수행하는 방안이 사용 된다.

2.2.3 전압 변동률을 이용한 의사결정 방안

전압변동률이 큰 폭으로 바뀌게 되는 경우에는 정상 시 계통의 상태보다 더 많은 양의 부하를 차단하여 신속하고 정확하게 수도권 지역의 저전압 발생현상을 방지하기 위한 목적으로 사용하였다. 짧은 시간 주기에서의 경우 Short-term 전압불안정 현상을 방지하기 위하여 적용되며, 긴 시간 주기에서의 경우 window를 적용하여 Long-term 전압불안정 현상을 방지하기 위하여 사용된다. 전압변동률이 계산되는 방법은 일정시간 동안 시간 window를 주고 시간간격 내에 여러 횟수에 걸쳐서 전압수준을 sampling하게 되는데 1초에 20회의 sampling을 Least square 기법을 사용하여 선정한다. Least square route value 계산의 최소값을 찾는 과정은 아래의 수식을 적용하였다.

$$Min \sum_{i=1}^n (f(x) - V_{sample, i})^2 \quad (9)$$

$$f(x) = at + b$$

여기서, V_{sample} = sampling된 전압 data
 t = 시간
 a = 전압변동률
 b = $f(x)$ 의 Y절편

수식(9)의 결과는 그림 2로 표현 된다.

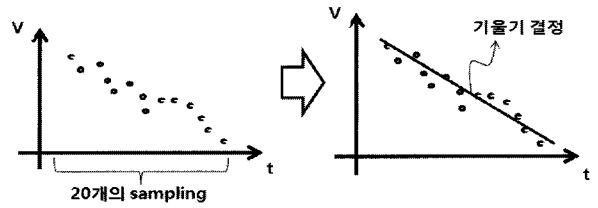


그림 2 Least square 기법을 적용한 전압 변동률 계산
 Fig. 2 Least square method using rate of change of voltage calculation

그림 2에서 표현 되는 1차함수의 기울기 a값이 전압변동률 계산 결과 값으로 0.05초 간격으로 전압 변동률이 측정 된다. 전압변동률을 적용하는 방식은 short term voltage collapse를 감지하여 가능한 빠르게 위험요소를 제거할 수 있고 계통의 심각성을 전압 변동률로 반영하여 빠르고 유연성 있는 대처가 가능한 장점을 가진다. 반면에 짧은 시간 term의 window에서 $\Delta V/\Delta t$ 를 계산하기 때문에 잘못하면 안정한 상태의 단순 부하변동 또는 순간적인 oscillation에서 동작하는 위험성을 가지기도 하며 1초 이내에 많은 전압을 sampling하기 위해서는 고속 측정 장비가 필요하다는 단점도 있다.[4]

3. 사례 연구

3.1 감시 모션의 선정

감시(관찰) 모션은 계통의 사고 발생 시 계통 상태를 가장 잘 반영할 수 있는 모션이어야 한다. 따라서 사고에 가장 민감한 모션이 선정되어야 하지만 계통의 심각한 사고에 따른 계통불안정 현상이 발생하면 조류계산이 수렴하지 않기 때문에 추가적인 계통 검토가 어려워진다. 이러한 경우 사용되는 알고리즘으로 본문에서 언급한 선로정수 연속조류계산(YV 해석)을 통하여 고려되는 사고의 심각성 정도와 사고에 가장 취약한 모션에 대한 정보를 제공한다. 선로 정수 연속조류계산은 사고를 진행시켜 가면서 계통이 붕괴하는 시점에서의 가장 민감한 모션에 대한 정보를 제공한다. 취약모션은 선로정수의 변화에 대한 각 모션의 유/무효전력 감도정도를 이용하여 제공된다. 그림 3은 선로정수 연속조류계산 개념을 보인다.

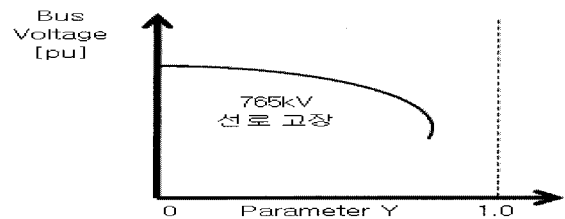


그림 3 선로정수 연속조류계산의 개념도
 Fig. 3 Concept of Branch Continuation Power Flow

그림 3에서 Y=1 까지 진행하면 선로가 완전 제거된 상태를 의미하며 선로고장이 발생하여도 계통이 수렴함을 의미한다. 그 이전에 계통이 붕괴하는 경우 선로고장 발생 시 계통이 불안정해짐을 의미한다. 계통이 불안정해지는 경우 nose point에서의 감도를 계산하면 선로고장에 가장 취약한 모선을 선별할 수 있다.

$$Participation\ Factor = \frac{\partial V_i}{\partial Y} \quad (10)$$

본 논문에서는 부하차단 다단계화를 위하여 앞 절에서 언급한 바 있는 실제 한전 계통에 대한 해석을 수행하였다. 검토계통은 2008년 하계 최대부하 계통으로 현행 유통한계를 고려하여 운전하고 있는 계통을 선정하였고 현행 부하모텔비율을 반영하였다. 다단계 부하차단 방안에 앞서 관찰모선의 선정은 Y-V 꼭짓점에서의 감도를 계산하여 무효전력 민감도 순위를 통하여 취약 모선 4 곳을 의사결정 기준수립을 위한 전압 관찰 모선으로 선정하였다. 765kV 루트고장에 대한 선로정수 연속 조류 계산을 적용하기 위하여 사고에 대한 해당 발전기의 탈락 및 선트 리액터 탈락을 고려하였다. 아래 내용은 3가지 의사 결정 방안에 대한 검토 절차, 상정사고 시나리오, 감시 모선 선정에 대하여 나타내었다.

i) 검토 절차

- Step1 : 유통전력 운영데이터 작성
- Step2 : 사고 발생 시 YV 해석 후 감시 모선 선정
- Step3 : 저전압 유지시간, 저전압 적분 값, 전압변동률에 대하여 검토
- Step4 : 동적 해석

ii) 상정 사고 시나리오

- 2초 : 선로 중앙에서 3상 Fault 적용
선트 리액터 탈락
- 2.0833초: 사고 제거
- 2.65초 : 발전기 탈락(당진 화력 5기)

표 1 감시 모선 선정(345 kV 모선)

Table 1 Monitoring bus location

| 모선 번호 | 모선 이름 | 감도(Participation Factor) |
|-------|-------|--------------------------|
| 4650 | 신수원3 | PF= 0.0622 |
| 4700 | 신용인3 | PF= 0.0608 |
| 4100 | 신안성3 | PF= 0.0579 |
| 4800 | 신진천3 | PF= 0.0550 |

그림 4는 저전압 유지시간을 이용한 부하차단으로 저전압 유지시간이 600msec 이상 유지할 경우 부하차단신호를 전송하게 된다. 1단계 부하차단이 수행 된 후 계통이 안정화 되면 저전압 유지시간을 만족하지 않게 되어 2단계 부하차단이 진행 되지 못한다. 그리고 탭 동작 이전에 계통이 불안정해지면 저전압 유지시간을 만족하지만, 탭 동작 이후에는 부하차단이 수행되어도 계통은 안정화되지 못한다. 그러므로 부하차단은 탭 동작이전에 수행 되어야 하고 765kV

선로고장 시 전압의 oscillation이 커서 계통이 불안정정도를 판단할 수 있는 저전압 유지시간을 선정하기 어렵다.

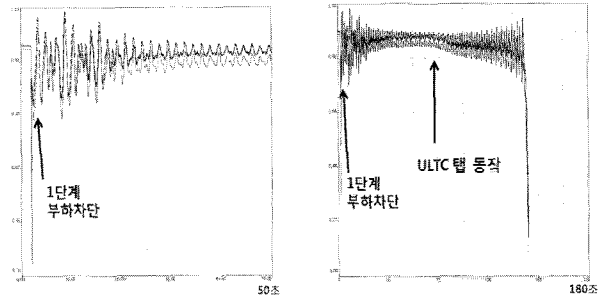


그림 4 저전압 유지시간을 이용한 부하차단
Fig. 4 Under Voltage using Load Shedding

저전압 적분값을 이용한 부하차단은 사고의 심각성에 따라서 저전압 적분 값이 증가 하게 되지만, 계통이 서서히 안정화 되면서 저전압 적분값이 감소하게 된다. 그림 5에서 1 단계 부하차단이 수행 된 후의 신수원 모선의 저전압 적분값의 변화를 나타 낸 것으로 계통이 안정화 되어 저전압 적분값이 20(kVsec.) 미만으로 감소되는 모습을 볼 수 있다. 1 단계 부하차단으로 계통이 안정화 되어 2단계 부하차단이 진행 되지 못한다. 그리고 탭 동작 이전에 계통이 불안정해지면 저전압 적분값은 상승하게 되지만, 탭 동작 이후에는 부하차단이 수행되어도 계통은 안정화되지 못한다. 그러므로 부하차단은 탭 동작이전에 수행 되어야 하고 765kV 선로고장 시 전압의 oscillation이 커서 계통이 불안정정도를 판단할 수 있는 저전압 적분값을 선정하기 어렵다.

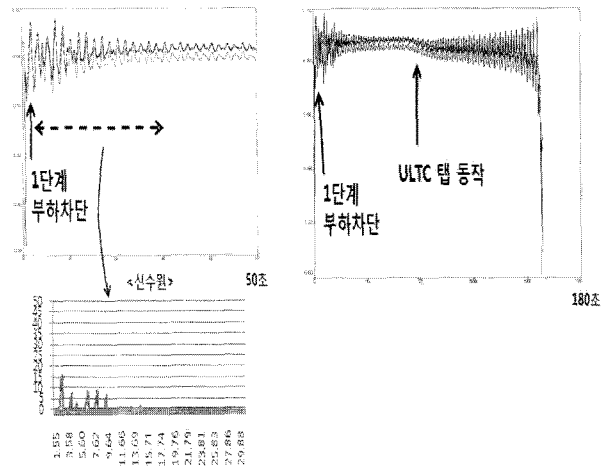


그림 5 저전압 적분 값을 이용한 부하차단
Fig. 5 Under Voltage integral calculation using Load Shedding

전압변동률을 이용한 부하차단은 사고에 민감한 모선일수록 전압이 크게 움직임을 잘 보여주고 있다. 표 1에 선정된 관찰 모선을 살펴보면 첫 번째 나열된 모선부터 사고에 가장 민감한 순으로 나열하였다. 그림 6은 전압변동률을 고려하여 부하차단 다단계를 검토한 결과로 4개의 관찰 모선

의 전압 변동률이 모두 -0.2 p.u. 이하로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 전압 변동률을 고려한 다단계 부하차단 의사결정을 감시모선의 전압변동률이 -0.2 p.u. 이하로 유지되면 단계별 부하 차단을 수행하였다. 동적 해석을 통하여 전압변동률을 계산하며 감시모선 4개 중 3개 모선의 의사결정이 '참'이면 부하차단을 수행한다.

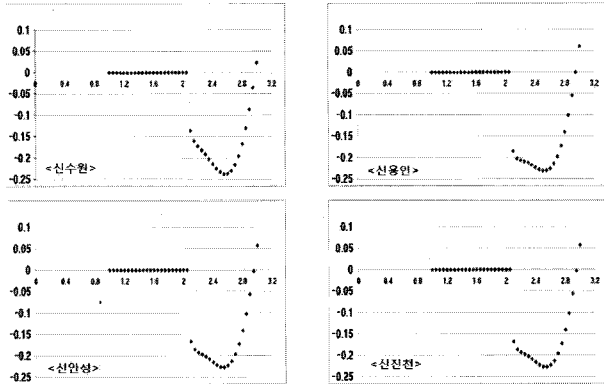


그림 6 관찰 모선의 전압 변동률
Fig. 6 Rate of change of voltage for monitoring bus

그림 7은 단계별 부하차단을 수행 한 기울기 결과이다. 단계별로 부하차단을 진행하였는데 1단계 부하차단 후에 기울기가 -0.2 p.u. 이하로 지속되어, 2단계 부하 차단을 수행하였다. 2단계 부하 차단 후에 기울기는 여전히 -0.2 p.u. 이하로 지속되어 3단계 부하차단을 수행한 결과 기울기는 -0.2 p.u. 이상으로 지속되어 추가 부하차단은 수행 되지 않는다.

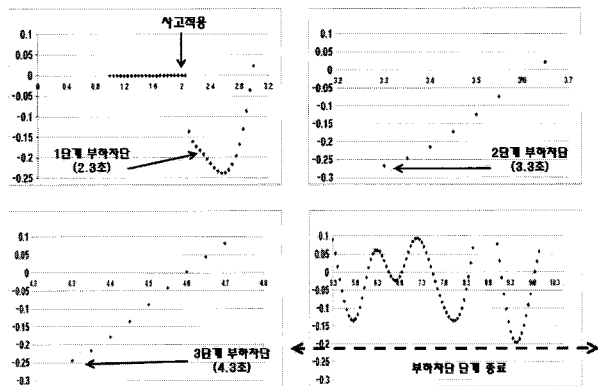


그림 7 다단계 부하차단 적용 기울기 결과
Fig. 7 Multi-level Load Shedding application slope result

그림 8은 단계별 부하차단을 수행 한 동적해석 결과이다. 부하차단 이전보다 부하차단 후에 전압이 안정화 되어가는 모습을 볼 수 있다. 총 3단계로 진행하였고 각 단계별로 부하차단이 적용 된 시점의 지연시간을 표시하였다.

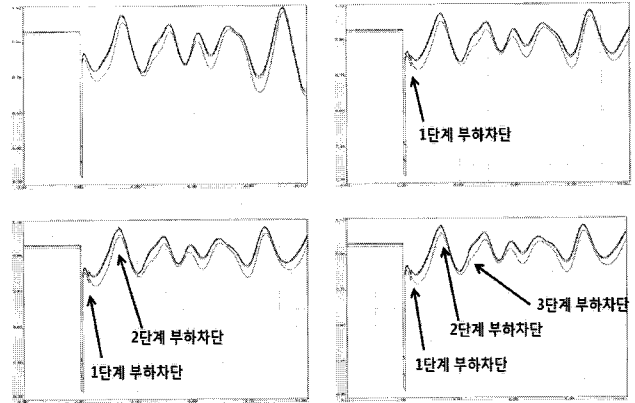


그림 8 다단계 부하차단 적용
Fig. 8 Multi-level Load Shedding application

3. 결 론

본 논문에서는 다양한 의사 결정 방안으로 저전압 유지 시간, 저전압 적분값, 전압 변동률을 고려하여 수도권 전압 안정도 다단계 부하차단 방안 에 관한 검토를 진행 하였고, 기존의 관찰 모선 개소를 무효전력 민감도 순위를 통하여 정하였으며, 그에 의거하여 부하차단 다단계를 수행하였다. 부하차단 의사 결정 방안에서 저전압 유지시간과 저전압 적분 값을 이용하여 부하차단을 수행 시 1단계에서 계통이 안정화 하여 다단계 부하차단이 적용되지 않았다. 전압변동률을 이용하여 부하차단을 수행 시 부하차단 조건을 만족 시켜 다단계 부하차단이 적용되었다. 전압변동률을 고려한 다단계 부하차단이 더 효율적인 방안으로 검토 되었다. 하지만 다양한 계통의 해석이 부족하였고 실제 계통에 적용 시 필요한 부하의 차단 양과 위치 그리고 비용의 최적화 된 조합을 찾는 알고리즘과 전압, 위상각, 주파수 불안정 현상의 발생 시 부하차단을 자동적으로 수행할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다. 정적 해석에서 선정 된 차단위치와 차단 용량을 적용 하여 보다 더 효율적인 부하차단 다단계화를 통한 계통의 안정화 검토 방안이 필요 할 것이다. 마지막으로 부하차단 다단계 검토 절차에서 중요시하는 사항은, 먼저 각 부하의 유도전동기 비율을 적용하여 고려하여야 하며 느린 동특성을 가지는 변압기 탭의 동작 이전에 부하차단이 수행되어야 한다. 따라서 부하차단 다단계를 구현하기 위해서는 무엇보다 유도전동기의 정확한 반영이 필요하며 이에 따라 계통의 위험 정도를 판단할 수 있는 2, 3단계의 의사결정 방안이 결정되어야 할 것이다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업 및 한국 전력거래소의 연구 지원에 의해 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] "Undervoltage Load Shedding Protection", Working Group C-13, System Protection Subcommittee IEEE PES Power System Relaying Committee
- [2] WECC, Undervoltage Load Shedding Guidelines, 1999.
- [3] C.W. Taylor, "Concept of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, NO. 2, April 1992.
- [4] Shinichi Imai, "Undervoltage load shedding improving security as reasonable measure for extreme contingencies", Power Engineering Society General Meeting, IEEE, Vol.2, 1754-1759, 2005.
- [5] D.Lefebvre, S.Bernard, T.VanCutsem, "Undervoltage load shedding scheme for the Hydro-Quebec system", IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 2004.
- [6] Abbas M.Abed, "WSCC Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology.", paper IEEE 0-7803-5569-5/99.1999.
- [7] 이상호, 강상희, 이성진, 오화중, 장병태, "한전 계통에서 저전압 부하차단의 기법 연구", 대한전기학회 2003년도 추계 학술대회 논문집 전력기술부문, pp.10-13, 2003년 11월.
- [8] 서상수, 이병준, 김태욱, 추진부, 이정호, "선로 정수 연속 조류계산을 이용한 가혹한 상정사고에 있어서 취약 지역 도출방안에 대한 연구", 대한 전기학회 2004년도 하계 학술대회 논문집 A, pp.113-116, 2004년 7월.
- [9] S.Kolluri, Tao He, "Design and Operating Experience with Fast Acting Load Shedding Scheme the Entergy System to Prevent Voltage Collapse", IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 2004
- [10] Prabha Kunder, 'Power System Stability and Control'. McGraw-Hill, 1994.

저 자 소 개



이 윤 환 (李 允 煥)

1981년 6월 29일생. 2008년 충주대 첨단과학기술대학 전기공학과 졸업. 2008년~현재 고려대 대학원 전자전기공학과 석사과정.
 Tel : 02-3290-3697
 E-mail : yunan2@korea.ac.kr



김 태 군 (金 泰 均)

1978년 5월 6일생. 2005년 고려대 공대 전기전자전파공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정.
 Tel : 02-3290-3697
 E-mail : harlang@korea.ac.kr



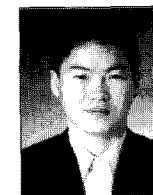
김 지 훈 (金 知 訓)

1980년 10월 31일생. 2008년 고려대 공대 전기전자전파공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전자전기공학과 박사 과정.
 Tel : 02-3290-3697
 E-mail : hanmiri@korea.ac.kr



이 병 준 (李 炳 峻)

1961년 7월 16일생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 아이오와 주립대 전력계통 석사 졸업. 1994년 동 대학원 전력계통 박사 졸업. 현재 고려대 전기공학과 정교수.
 Tel : 02-3290-3242
 E-mail : leeb@korea.ac.kr



강 부 일 (姜 富 日)

1971년 6월 1일생. 1994년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1996년 ~ 2001년 한국전력공사 근무. 2001년 ~ 현재 전력거래소 근무.
 Tel : 02-3290-3242
 E-mail : bikang@kpx.or.kr



조 종 만 (趙 鍾 萬)

1959년 7월 27일생. 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1998년 경상대 대학원 전기공학과 공학석사. 2006년 한양대 대학원 전기공학과 공학박사. 1986년 ~ 2001년 한국전력공사 근무, 2001년 ~ 현재 전력거래소 부장.
 E-mail : jongman@kpx.or.kr