

전압안정도 개선을 위한 무효전력 제어

김 건 중*, 김 원 겸*, 정 태 호**, 이 상 중**
 충남대학교*, 한전기술연구원**

Abstract : This paper presents the effect of the voltage proximity index for the voltage collapse in power systems. The reactive generation limits are considered for the determination of the voltage proximity index. This paper also shows how the VAR investment ranking order works by the sensitivity index(proximity index). Simulation has carried out with the IEEE 14 bus system and has shown the voltage proximity index working well.

1. 서 론

전력계통의 부하가 점진적으로 증가되고 부하밀도가 과거보다 한층 증가되는 요즘 특정지역의 무효전력 수급불균형으로 인한 전압안정도의 문제는 상당히 심각한 문제로 대두되고 있다. 각종 제어기술이 발전된 현대에 계통의 유효전력 수급문제는 거의 문제점으로 되지 않는 상황에 있다. 그러나 유효전력 수급만을 만족한다고 계통이 안정하게 운전된다는 보장을 할 수 없는 경우가 최근 선진국에서 많이 발생되고 있다. 이와같은 무효전력 수급불균형에 의한 계통의 전압붕괴 현상은 계통의 각종 보호기기의 제어를 한층 어렵게 하고 있다. 계통이 전압붕괴 점에 이르게되면 이 경우 어떠한 계통제어도 계통을 안정하게 할 수 없고 오히려 제어 자체가 점진 운전을 불안정하게 만드는 현상을 초래한다.

이러한 전압붕괴 현상은 벨기에, 스웨덴, 캐나다, 일본, 폴란드, 미국등의 선진국에서 경험되고 있다. 특히

하게 침두부하시 냉방부하가 급속히 증가되면서 이러한 전압붕괴의 위험성이 증대되고 있는 실정이다. 급속한 부하증가는 운전상 어려운 문제점을 안고 있다. 부하증가 이전에 계통은 정상적으로 운전되고 있을 것이다. 그러나 부하가 급속히 증가하면 미처 이에따른 각종 제어장치들을 투입할 여유가 없다. 따라서 비록 계통에 충분한 제어설비들이 있다할 지라도 미처 투입하지 못함으로 부하증가시 계통은 안정하게 운전될 수 없다. 일반적으로 유효전력은 발전기의 조속기들에 의하여 어느정도 부하추종 능력을 보유하고 있다. 그러나 무효전력의 경우 급속한 부하증가는 고속 여자기를 보유하고 있는 경우 어느정도 흡수할 여력이 있지만 부하증가로 인한 선로조류 증가가 선로손실을 급격히 증가시키게 된다. 따라서 손실분 만큼의 전력이 부하증가로 간주될 수 있으므로 발전기는 점점 출력을 증가시켜야 되는 문제를 야기시킨다. 궁극적으로 계통의 전압이 저하되고 이로인한 전압붕괴 상태로 진전되게 된다.

이러한 중부하시 급격한 부하증가로 인한 계통의 전압붕괴 현상을 파악하기 위하여 많은 사람들의 의하여 연구되고 있다. 그러나 아직까지 실계통에 적용할 수 있는 연구는 거의 없는 실정이며, 단지 전압붕괴 근접도 지표를 계산할 수 있는 연구는 Glavitch등에 의하여 발표되었다. 그러나 이 연구는 계통을 2모선 등가화하여 지표를 유도하였기 때문에 현실적으로 정확히 결과가 일치하지 않는 문제점이 있고 지표의 문턱값을 결정하는 어려운 문제가 남아있다. Carpentier등이 연구는

최적조류계산 모형을 이용하여 전압붕괴 근접도 지표를 계산할 수 있는 방법을 보이고 있다. 이 연구는 최적조류 계산이 현실적으로 많은 계산기산을 소요하고 또한 안정한 해법을 찾기가 어려운 문제로 남아있다. 그리고 지표값을 수식적으로 유도하였지만 정확한 계산 알고리즘이 유도되지 못하고 단지 수치적으로 감도들을 사용하여 해결하고 있다. 알고리즘으로 처리된 지표의 값이 실무적으로 이용할 수 있는 오차 허용범위에 존재한다 할 지라도 이 연구의 결정적인 문제점은 최적조류계산 자체의 문제가 있다.

본 연구는 이미 개발된 전압붕괴 근접도 지표를 이용하여 계통의 전압붕괴를 사전에 제어할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 계통의 문제를 정적인 관점에서 각 모선별로 전압붕괴 근접도 지표를 우선순위에 따라 나열하고 이를 이용하여 해당 모선에 보상용 콘덴서를 설치하여 계통의 전압붕괴를 완화시키고 궁극적으로 안정한 계통운전을 할 수 있게 하고자 한다.

2. 본 문

전압붕괴 현상이 물리적으로 선로손실의 급격한 증가에 기인된다는 사실이 이미 발표되었다. 이와같은 현상은 증부하시 부하가 증가하게되면 이로인한 선로조류는 증대되고 이 때 선로손실이 지수적으로 증가하게 된다. 따라서 임계부하 부근에서는 비록 부하증가를 감당하기 위하여 발전출력을 증가시키더라도 발전출력의 증가분이 부하에 공급되지 못하고 계통손실에 대부분 기여되는 기현상이 발생된다. 선로손실이 급격히 증가되면 부하모선 전압은 더욱 악화되고 이로인한 무효전력 손실이 더욱 증가되게 된다. 이러한 악순환으로 결국 계통은 전압붕괴로 진전되게 된다. 전압붕괴 현상을 해석하기 위하여 수학적인 모형을 다음과 같이 정의한다.

$$\text{Min. } P_{\text{Loss}}(V_D, \theta) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } P(V_D, \theta) = P^{\text{spec}} \quad (2)$$

$$Q_D(V_D, \theta) = Q_D^{\text{spec}} \quad (3)$$

이 문제는 제약조건이 있는 최적화 문제이다. 따라서 제약조건이 있는 문제를 변환하는 라그랑주 상대함수를 정의하면 다음과 같다 :

$$L = P_{\text{Loss}}(V_D, \theta) + \lambda_P [P(V_D, \theta) - P^{\text{spec}}] + \lambda_Q [Q_D(V_D, \theta) - Q_D^{\text{spec}}] \quad (4)$$

이 때의 최적조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{\partial P_{\text{Loss}}}{\partial \theta} + \frac{\partial P}{\partial \theta} \lambda_P + \frac{\partial Q_D}{\partial \theta} \lambda_Q = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial V_D} = \frac{\partial P_{\text{Loss}}}{\partial V_D} + \frac{\partial P}{\partial V_D} \lambda_P + \frac{\partial Q_D}{\partial V_D} \lambda_Q = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_P} = P(V_D, \theta) - P^{\text{spec}} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_Q} = Q_D(V_D, \theta) - Q_D^{\text{spec}} = 0 \quad (8)$$

식(7), (8)은 현재 운전점이 조류계산을 만족하는 상태이므로 최적조건을 당연히 만족하고 있다. 따라서 식(5), (6)의 최적조건식으로부터 λ_P, λ_Q 값을 구하면 다음과 같다 :

$$\begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{Loss}}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{\text{Loss}}}{\partial V_D} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)로 주어지는 최적승수 λ_P, λ_Q 값은 등호제약조건을 만족하면서 손실을 최적화하는 값이다. 그런데 이렇게 구하여진 λ_P, λ_Q 값은 비로 제약조건을 해제함에 따른 손실감도를 의미하게 된다.

$$\frac{\partial L}{\partial Q_D^{\text{spec}}} = -\lambda_Q \quad (10)$$

즉 모선전력, 무효전력 또는 보상설비 투입량, 이 변화됨에 따른 손실변화의 감도이다. 이 감도값이 무한대가 되는 점이 바로 전압붕괴점이 된다. 그런데 증부하시 계통을 전압붕괴로 부터 안전하게 운전하기 위하여는 이 지표의 값이 일정 문턱값 이하에서 운전되도록 무효전력 보상장치들을 제어하여야 한다. 문턱값의 결정은 실무적으로 적절한 수준에서 결정될 문제이다. 계통을 지나치게 여유있게 운전하고자 하는 경우 이 값은 상대적으로 낮은 값을 설정하고 만약 최대한 계통의 공급능력을 이용하고자 하는 경우 상대적으로 높은 문턱값을 설정하여야 할 것이다.

본 연구에서는 주어진 문턱값 이하에서 계통운전을 하고자 하는 경우 사전에 얼마만큼의 무효전력 보상설비를 투입할 것인가 결정하고자 한다. 이와같은 목적을 달성하기 위하여 어느모선의 설비를 우선적으로 투입하여야 할 것인가 결정하여야 한다. 식(10)에 의하여 결정된 λ_Q 는 전압붕괴 근접도 지표를 나타내고 이 정보는 또한 해

당모선이 전압붕괴에 얼마나 민감한지 그 정도를 나타내는 지표이다. 따라서 이 지표의 값이 가장 큰 모선은 단위 보상설비 투입시 전압붕괴 개선도가 가장 큰 모선으로 간주된다. 따라서 전압붕괴 근접도 지표가 주어진 문턱값보다 큰 경우 근접도 지표값이 가장 큰 모선부터 순차적으로 무효전력 보상설비를 투입하면 전압안정도를 효과적으로 유지할 수 있는 운전을 할 수 있다.

3. 사례연구

본 연구의 결과를 다음과 같은 14모선 계통에 적용하여 전압붕괴 근접도 지표가 가장 큰 모선부터 보상설비를 투입하는 것이 가장 효과가 있음을 검증하기로 한다.

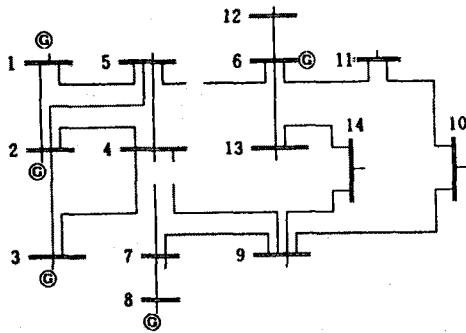


그림1 14모선 계통도

표1 14모선 계통 모선자료

| BUS | ID | V | PG | QG | PD | QD |
|-----|----|--------|--------|---------|--------|---------|
| 1 | 1 | 1.0600 | 2.3246 | -0.1587 | 0.0000 | 0.0000 |
| 2 | 2 | 1.0450 | 2.8000 | 2.8571 | 0.4108 | 0.5416 |
| 3 | 2 | 1.0100 | 0.0182 | 0.2543 | 1.8148 | 0.8104 |
| 4 | 3 | 1.0000 | 0.0248 | 0.0392 | 0.9209 | -0.1663 |
| 5 | 3 | 1.0000 | 0.0004 | 0.0697 | 0.1464 | 0.0682 |
| 6 | 2 | 1.0700 | 0.0000 | 0.2104 | 0.2157 | 0.3198 |
| 7 | 3 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0331 | 0.0000 | 0.0000 |
| 8 | 2 | 1.0900 | 0.0000 | 0.2400 | 0.0000 | 0.0000 |
| 9 | 3 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.5683 | 0.7080 |
| 10 | 3 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1733 | 0.2474 |
| 11 | 3 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0673 | 0.0767 |
| 12 | 3 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1175 | 0.0682 |
| 13 | 3 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2600 | 0.2474 |
| 14 | 3 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2870 | 0.2132 |

초기 모선전력자료는 표3과 같다. 이때 초기 모선전력의 결정은 실제 상황이 아니고 전압이 상당히 낮은 수준에

표2 14모선 계통 선로자료

| LINE | FROM | TO | ZR[Ω] | ZI[Ω] | TAPPQ | YC[1/Q] |
|------|------|----|--------|--------|--------|---------|
| 1 | 1 | 2 | 0.0194 | 0.0592 | 1.0000 | 0.0528 |
| 2 | 2 | 3 | 0.0470 | 0.1980 | 1.0000 | 0.0438 |
| 3 | 2 | 4 | 0.0581 | 0.1763 | 1.0000 | 0.0374 |
| 4 | 1 | 5 | 0.0540 | 0.2230 | 1.0000 | 0.0492 |
| 5 | 2 | 5 | 0.0570 | 0.1739 | 1.0000 | 0.0340 |
| 6 | 3 | 4 | 0.0670 | 0.1710 | 1.0000 | 0.0346 |
| 7 | 4 | 5 | 0.0134 | 0.0421 | 1.0000 | 0.0128 |
| 8 | 5 | 6 | 0.0000 | 0.2520 | 0.9320 | 0.0000 |
| 9 | 4 | 7 | 0.0000 | 0.2091 | 0.9780 | 0.0000 |
| 10 | 7 | 8 | 0.0000 | 0.1762 | 1.0000 | 0.0000 |
| 11 | 4 | 9 | 0.0000 | 0.5562 | 0.9690 | 0.0000 |
| 12 | 7 | 9 | 0.0000 | 0.1100 | 1.0000 | 0.0000 |
| 13 | 9 | 10 | 0.0319 | 0.0845 | 1.0000 | 0.0000 |
| 14 | 6 | 11 | 0.0950 | 0.1989 | 1.0000 | 0.0000 |
| 15 | 6 | 12 | 0.1229 | 0.2558 | 1.0000 | 0.0000 |
| 16 | 6 | 13 | 0.0662 | 0.1303 | 1.0000 | 0.0000 |
| 17 | 9 | 14 | 0.1271 | 0.2704 | 1.0000 | 0.0000 |
| 18 | 10 | 11 | 0.0820 | 0.1921 | 1.0000 | 0.0000 |
| 19 | 12 | 13 | 0.2209 | 0.1999 | 1.0000 | 0.0000 |
| 20 | 13 | 14 | 0.1709 | 0.3480 | 1.0000 | 0.0000 |

서 운전되는 전력이 될 때까지 점차 일정율로 증가시킨 모의 자료이다. 초기 조류계산 결과는 표3와 같다. 계산결과에서 보듯이 전압붕괴 근접도지표의 값이 높은 모선에서 전압이 상대적으로 상당히 낮은 것을 볼 수 있다.

표3 초기 조류계산 결과 및 전압붕괴 근접도 지표

| BUS NO. | V | θ | λ_q |
|---------|--------|----------|-------------|
| 1 | 1.0600 | 0.000 | 0.0000 |
| 2 | 1.0450 | -0.082 | 0.0000 |
| 3 | 1.0100 | -0.380 | 0.0791 |
| 4 | 0.9568 | -0.287 | 0.0551 |
| 5 | 0.9685 | -0.246 | 0.0429 |
| 6 | 1.0700 | -0.483 | 0.0000 |
| 7 | 0.9161 | -0.399 | 0.0848 |
| 8 | 0.9601 | -0.399 | 0.0779 |
| 9 | 0.8609 | -0.466 | 0.1041 |
| 10 | 0.8682 | -0.476 | 0.1037 |
| 11 | 0.9555 | -0.481 | 0.0621 |
| 12 | 1.0114 | -0.508 | 0.0274 |
| 13 | 0.9834 | -0.502 | 0.0451 |
| 14 | 0.8508 | -0.518 | 0.0619 |

다음은 이와같은 초기 전압을 개선하고 계통의 전압안정성을 향상시키기 위하여 근접도 지표의 순으로 모선무효전력을 점차 증가시켜가도록 한다. 지표의 우선 순위별로 수작업에 의하여 각각 다음과 같이 보상설비를 투입하였다.

표4 보상설비 투입 순서 및 투입량(단위MVAR)

14번(30) --> 10번(10) --> 9번(10) --> 7번(10)
 ---3번(10) --> 9번(10) --> 3번(10) --> 3번(10)

표4와 같이 보상설비를 투입한 경우 전압이 현격히 낮았던 모선들의 전압붕괴 근접도 지표는 그림3과 같다. 그림에서 모두가 지표의 값이 보상설비류 투입함에 따라 지표의 값은 점차 개선됨을 볼 수 있으며, 단지 이때 초기 투입량은 14모선에 30[MVAR]이고 이후는 각각 10[MVAR]점차 증가시켰다. 초기 지표의 값은 14모선에 해당되는 값이 가장 많이 감소하였음을 볼 수 있다. 다른 모선들의 지표값이 약간 상승함을 볼 수 있는데 이 현상은 이 때 3번 발전기가 무효전력 상한치에 걸려 3번 모선이 부하모선으로 변환된 과정이다.

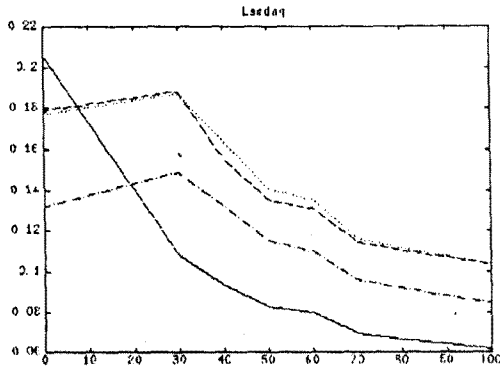


그림3 보상설비 투입에 따른 전압붕괴 근접도

그림4는 보상설비 투입에 따른 모선전압의 변화를 보인다. 모선전압들이 보상설비를 투입함에 따라 점차 개선됨을 볼 수 있다. 이 때 초기에 9번모선 전압이 급격히 저하함을 볼 수 있으나 이것은 3번모선 발전기 무효전력이 상한치에 달하여 발생한 일시적인 현상이다.

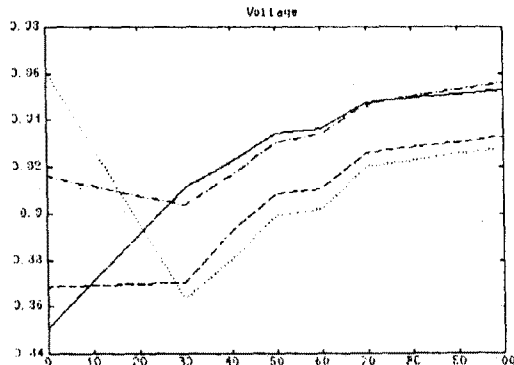


그림4. 보상설비 투입에 따른 모선전압

그림5는 보상설비 투입에 따른 총 발전량과 계통손실을 보인다. 보상설비를 투입함에 따라 유효전력 손실과 무효전력 손실 그리고 유효전력 발전량은 점차 감소함을 볼 수 있다. 그러나 무효전력 발전량은 좀 더 급격히 감소함을 볼 수 있다. 이는 보상설비가 무효전력 발전기로 작용함을 의미하며, 거의 투입된 보상설비량 만큼 무효전력 발전량은 감소된다.

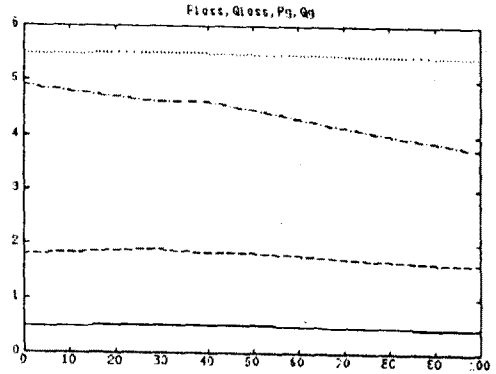


그림5. 보상설비 투입시 계통손실 및 총발전량

4. 결론

본 논문은 전압붕괴 근접도 지표가 보상설비 제어에 효과적으로 사용될 수 있음을 보여주었다. 간단한 14모선 계통에 적용하여 연구의 타당성을 검증하였으며 시뮬레이션 결과 예상결과와 완전히 일치됨을 보여주고 있다. 현재 본 연구의 결과를 실제계통에 적용하여 실용화 하는 연구가 진행중에 있다.

참고문헌

1) T. Van Cutsem, "A Method to Compute Reactive Power Margins with Respect to Voltage Collapse", IEEE Power Engineering Society for Presentation at the IEEE/PES 1990 Winter Meeting, Atlanta, Georgia, February 4-8, 1990.
 2) O. Obadina, G. J. Berg, "VAR Planning for Power System Security", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989.