

Applications of System Loss Sensitivity Index to Power Systems

李 尚 中*
(Sang-Joong Lee)

Abstract - In this paper, the system loss sensitivity index that implies the incremental system loss with respect to the change of bus power is derived using optimization technique. The index λ reaches ∞ at critical loading point and can be applied to actual power systems for following purposes. 1)Evaluation of system voltage stability 2)Optimal investment of reactive power focused on minimizing system loss and maximizing system voltage stability 3)Optimal re-location of reactive power focused on minimizing system loss and maximizing system voltage stability 4)Optimal load shedding in case of severe system contingency focused on minimizing system loss and maximizing system voltage stability
Case studies for each application have proved their effectiveness.

Key Words : optimization technique, system loss sensitivity index, voltage collapse proximity indicator, reactive power investment, load shedding

1. 서 론

경기회복에 따라 전력수요가 급증하고 있다. 신규 전원의 用地難, 환경규제와 민원의 증가로 인하여 지상권의 확보가 갈수록 어려워지고 있다. 전력설비의 대용량-장거리화 되고 있으며 기존 전력설비 이용률의 극대화가 불가피해짐에 따라 초래되는 계통손실의 증가와 신뢰도 저하는 계통의 안정운용에 심각한 위협을 주고 있다. 전력계통은 기본적으로 발전기, 송전선로 및 부하로 구성되어 있으며 통상 송전선로의 전력손실은 총 발전량의 1~2%에 지나지 않는다. 그러나 계통전압이 비정상적으로 저하되면 같은 양의 전력을 전송하기 위하여 더 많은 선로전류를 흘려야 하므로, 전류의 자승에 비례하는 계통손실은 지수적으로 증가하게 된다. 따라서 계통전압강하가 어떠한 임계치가 되면 전송된 전력이 부하에 도달하지 못하고 모두 선로손실로 소모되어 계통붕괴로 이어지게 되는데, 이 현상을 전압붕괴(voltage collapse) 또는 전압불안정(voltage instability)이라 정의한다. 전압불안정이 발생하면 유효전력의 여유가 있음에도 불구하고 공급이 불가능한 현상이 발생된다. 본 논문에서는 최적화기법을 이용하여 전압붕괴점에서 무한대

의 값을 가지는 계통손실 감도지표를 소개하고 이를 계통 전압안정도의 평가, 계통손실 최소화를 위한 무효전력의 투자, 기존 무효전력설비의 재배치, 비상시 최적부하차단 우선순위 결정 등에 적용하는 방안을 제시하고자 한다.

2. 계통손실감도 지표

조류계산의 결과로 부터, 부하의 변화에 따른 계통손실의 변화를 추적할 수 있는 방법을 모색해 보자. 이러한 문제는 계통손실을 목적함수로 조류계산식을 제약조건으로 하는 비선형 최적화 문제로 모형화할 수 있다. 이를 수식으로 정형화하면[1],

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } P_{Loss} \\ & \text{s.t. } P(V_D, \theta) = P^{SPEC} \\ & \quad Q(V_D, \theta) = Q^{SPEC} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 P^{SPEC}, Q^{SPEC} 은 모선지정전력, V_D 는 부하모선의 전압을 나타낸다. 여기서 라그랑주 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} L = & P_{Loss}(V_D, \theta) \\ & + \lambda_P^T [P(V_D, \theta) - P^{SPEC}] + \lambda_Q^T [Q(V_D, \theta) - Q^{SPEC}] \end{aligned} \quad (2)$$

L 이 최적점에 도달하였을 경우 다음과 같은 최적조

* 正 會 員 : 서울産業大 工大 電氣工學科 專任講師
接受日字 : 1999年 10月 9日
最終完了 : 2000年 1月 19日

건이 성립한다.

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \theta} \right] = \left[\frac{\partial P_{LOSS}}{\partial \theta} \right] + \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right]^T \lambda_P + \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right]^T \lambda_Q = 0 \quad (3)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial V_D} \right] = \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial V_D} + \left[\frac{\partial P}{\partial V_D} \right]^T \lambda_P + \left[\frac{\partial Q}{\partial V_D} \right]^T \lambda_Q = 0 \quad (4)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \lambda_P} \right] = P(V_D, \theta) - P^{SPEC} = 0 \quad (5)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \lambda_Q} \right] = Q(V_D, \theta) - Q^{SPEC} = 0 \quad (6)$$

최적조건은 본래의 변수 $[V_D, \theta]$ 와 제약조건에 의하여 도입된 변수 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 두가지로 분류됨을 알 수 있다. 라그랑주 함수를 모션지정전력 P^{SPEC} , Q^{SPEC} 에 대하여 미분하면 다음과 같이 주어진다.

$$\left[-\frac{\partial L}{\partial P^{SPEC}} \right] = -\lambda_P \quad (7)$$

$$\left[-\frac{\partial L}{\partial Q^{SPEC}} \right] = -\lambda_Q \quad (8)$$

식 (7),(8)은 모션의 유무효전력이 미소량 증가할 때 라그랑주 함수의 증가분을 의미하며, 이 값은 바로 $-\lambda_P$, $-\lambda_Q$ 가 됨을 쉽게 알 수 있다. 현재의 운전점에서 조류계산의 결과 식 (5),(6)의 최적조건을 만족하므로 이는 곧 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 변수에 대하여는 최적인 상태를 의미한다. 따라서 식 (2)로 주어지는 라그랑주 함수는 오직 계통손실만을 포함하게 되고 λ_P, λ_Q 는 모션전력의 미소량 증가시 계통손실의 증가를 의미하게 된다.

식 (3),(4)를 행렬의 형태로 표현하면

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L}{\partial V_D} \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial V_D} \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

단, J 는 자코비안의 정의에 의하여

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V_D} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V_D} \end{bmatrix} \quad (10)$$

로 표시된다. 식을 (9)로부터 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값을 구하면

$$\begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial V_D} \end{bmatrix} \quad (11)$$

단, λ_P, λ_Q 는 $1 \times N$ 벡터이다. $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 계산은 단지 조류계산에서 이미 계산된 자코비안의 역행렬에 손

실감도 벡터를 곱하는 계산만을 필요로 하므로 계산량은 조류계산 시간과 거의 동일하다.

3. λ 지표를 이용한 전압안정도 분석

식 (11)은 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값이 자코비안 행렬과 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있다. 만약 전압붕괴점에 접근하게 되면 자코비안 행렬의 행렬식 값은 0에 접근하게 되고 따라서 자코비안 행렬의 역행렬로부터 계산된 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값은 무한대로 접근하게 된다. 현재의 운전점에서 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값을 계산하여 그 값이 무한대로 나타나면 이는 곧 현재의 운전점이 전압붕괴점이라는 것을 의미하며, 무한대는 아니라도 상당한 값을 가질 경우 현재의 운전점이 전압붕괴점에 상당히 가까이 존재하고 있다는 것을 의미하게 된다. 따라서 모션전력 변화에 대한 계통손실의 변화를 의미하는 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 는 계통의 전압안정도를 평가하는 지표(voltage collapse proximity indicator)로 사용될 수 있다.[2]

여기서 모형계통의 사례를 통하여 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 지표의 물리적 특성을 확인하여 보자. 그림 1은 두 대의 발전기(모션 1,3, 단 모션 1은 slack)와 세개의 부하모션(모션 2,4,5)으로 구성된 5모션 계통으로서 모션 1,3의 전압은 각각 1.02 p.u.로 일정하게 유지된다. 선로정수를 표 1에, base case의 각 모션의 주입전력, 전압 및 부하각을 표 2에 기술하였다. 계통전압의 평균치(system Average Voltage Profile; 편의상 AVP로 표기)는 부하모션전압 V_i 와 부하의 크기 $P_i + jQ_i$ 를 감안하여

$$AVP = \frac{\sqrt{[(\sum V_i * P_i)^2 + (\sum V_i * Q_i)^2] / [(\sum P_i)^2 + (\sum Q_i)^2]}} \quad (12)$$

로 정의하고 부하는 모두 일정역률의 정전력 부하로 가정하였다.

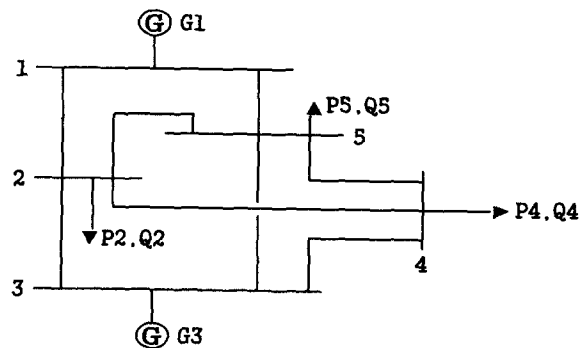


그림 1 5모션 계통
Fig. 1 5 Bus test system

표 1 선로정수
Table 1 Line parameters.

from	to	G	B	Line Charging
1	2	1.40056	-5.60224	Bus 1 0.03600 Bus 2 0.01800 Bus 3 0.08200 Bus 4 0.03575 Bus 5 0.03575
1	5	2.81647	-7.48352	
2	3	2.45000	-5.87000	
2	4	3.05000	-4.45170	
2	5	3.13000	-2.09335	
3	4	3.70000	-3.73000	
3	5	1.12985	-4.47675	
4	5	2.05362	-4.16883	

표 2 base case 조류계산결과
Table 2 Result of power flow computation for base case

bus	P	Q	V	θ	λ_P	λ_Q
1	1.351	.457	1.02	0.000		
2	-1.1	-.246	.962	-.092	.073	.024
3	1.2	.440	1.02	-.032		
4	-.408	-.175	.953	-.081	.089	.036
5	-.950	-.450	.960	-.078	.062	.031
P _{Loss} = .093 Q _{Loss} = .025 AVP = .959						

초기조류계산 결과 각 부하모선의 전압붕괴 근접도지표 [λ_P, λ_Q]의 값은 표 2에서 모두 1 보다 상당히 작은 값으로 주어지고 있으며 이는 계통이 전압안정도 측면에서 상대적으로 안정되어 있음을 의미한다. 그림 2는 base case 상황에서 계통이 전압붕괴점에 도달하기까지 각 모선의 부하를 일정비율로 서서히 증가시켜 가는 동안 계통손실의 변화를 나타낸다. 전력손실은 전압붕괴점에 접근할수록 크게 증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 전압붕괴 현상이 계통의 손실증가에 기인한다는 사실을 뒷받침하여 주는 좋은 예라 하겠다. 그림 3과 4는 계통부하 ($P_2+P_4+P_5$)의 증가에 따르는 각 모선전압과 2번 모선의 전압붕괴 근접도 지표값 λ_Q 의 변화를 나타낸다. 전압붕괴점 부근에서는 전 부하모선 전압이 크게 저하되며 λ_Q 지표값이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다.

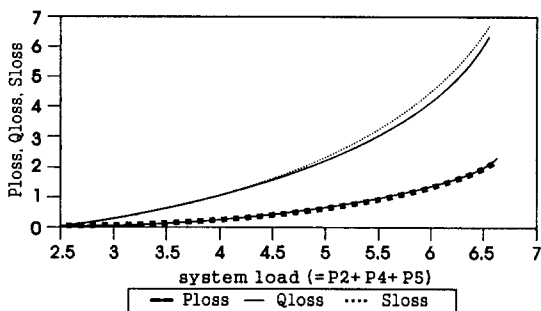


그림 2 부하증가와 계통손실변화
Fig. 2 System loss variation along the system load increase

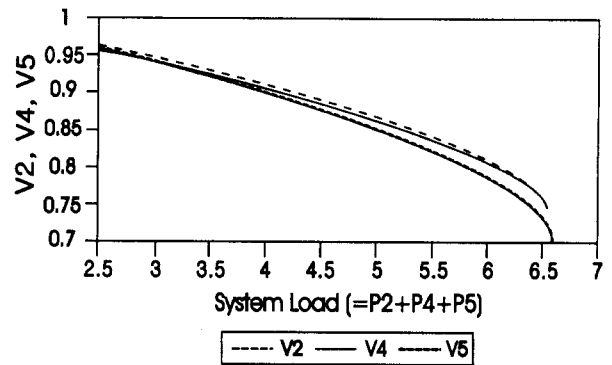


그림 3 부하증가와 모선전압변화
Fig. 3 Voltage variation of load buses along the system load increase

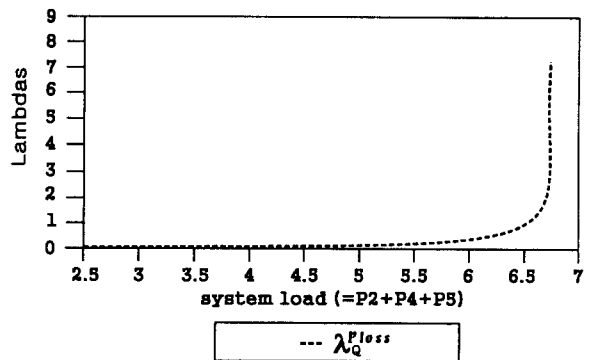


그림 4 부하증가와 2번모선 λ 값의 변화
Fig. 4 λ variation on bus 2 along the system load increase

큰 λ 지표값을 가지는 모선은 동일한 양의 부하변동이 야기하는 계통손실의 변화가 그만큼 민감하다는 것을 뜻하며 곧 이 모선이 타모선에 비하여 전압안정도면에서 상대적으로 취약함을 의미한다. 따라서 λ 지표값의 비교를 통하여 전압안정도면에서 가장 취약한 모선을 정확히 지적할 수 있다. 계통이 전압안정성을 유지하기 위해서는 각 모선의 λ 값이 일정치 이하로 유지됨이 바람직하다.

4. λ 지표에 의한 무효전력설비 투자

계통 운전원은 발전기, OLTC, 전력컨덴서 등으로 무효전력을 공급하여 계통의 전압을 보상하게 된다. 전력컨덴서는 가장 저렴한 무효전력 보상설비로서 현재 전력계통에 널리 사용되고 있다. λ_Q 는 모선 무효전력의 투입량에 대한 계통의 손실변화를 나타내는 감도지표이므로, 각 모선에 주어지는 λ_Q 지표값이 가장 큰 모선에 ΔQ MVAR 씩의 무효전력을 우선 투자하여 간다면 계통손실이 가장 효과적으로 감소할 것이다.[3,4] λ_Q 지표에 의한 무효전력 설비투자 알고리즘을 흐름도로 나타내면 그림 5과 같다.

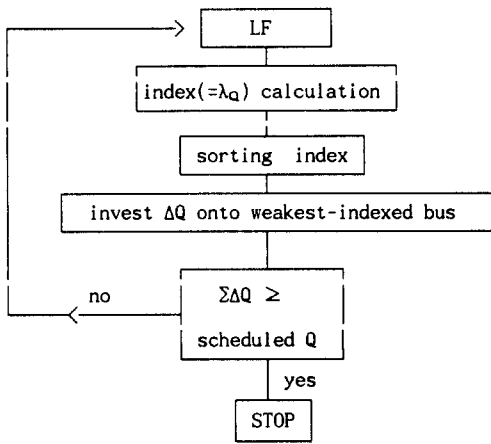


그림 5 λ_Q 지표에 의한 VAR 투자 알고리즘
 Fig. 5 New VAR investment algorithm based on λ_Q index

그림 1과 동일한 5모선 계통에서 base case의 부하상태가 표 3과 같이 주어졌을 때, 1.6 p.u. 용량의 무효전력을 λ_Q 지표에 의한 방법으로 투자하고 전압이 낮은 모선에 우선적으로 무효전력을 투자하는 경우와 계통손실 및 전압분포상태를 비교해 보았다.

표 3 base case 조류계산결과
 Table 3 Result of power flow computation for base case

bus	P	Q	V	θ	λ
1	6.014	2.46	1.04	0.0	
2	-2.680	-0.6	0.833	-0.481	-0.307
3	1.1	2.783	1.02	-0.489	
4	-0.950	-0.407	0.825	-0.498	-0.339
5	-2.320	-1.1	0.817	-0.401	-0.347
P _{Loss} = 1.164 AVP = 0.8254					

표 4 전압 및 λ_Q 지표에 의한 투자효과 비교
 Table 4 Comparison of two types of MVAR investment

investment index	SC ₂ +SC ₄ +SC ₅ = 1.6 pu	P _{Loss}	Q _{Loss}	V ₂ , V ₄ , V ₅	AVP
λ	SC ₂ = 0.5072 SC ₄ = 0.2511 SC ₅ = 0.8441	0.8286	2.2433	V ₂ = 0.9018 V ₄ = 0.8936 V ₅ = 0.9023	0.9007
voltage	SC ₂ = 0.4421 SC ₄ = 0.3794 SC ₅ = 0.7810	0.8300	2.2531	V ₂ = 0.9 V ₄ = 0.9 V ₅ = 0.9	0.9000

표 4에 나타난 바와 같이 λ_Q 지표에 근거한 투자방법이 계통손실과 전압분포 측면에서 모선전압정보에 의한 투자방법 보다 더 유리함을 알 수 있다. SC₂, SC₄ 및 SC₅ 는 각각 2, 4, 5번 모선에 투자된 무효전력의 용량을 나타낸다.

5. λ 지표에 의한 무효전력설비의 재배치

사회의 발전과 함께 계통망 구성과 부하분포는 끊임없이 변천되므로 기존 무효전력설비의 투자위치와 용량이 현실점에서도 과연 적절한지 재검토할 필요가 있다. 각 모선에 주어진 λ_Q 지표값의 비교를 통하여 무효전력설비의 위치가 전압안정도와 손실최적화 관점에서 적당한지를 확인할 수 있다. λ_Q 값이 양호한 모선에 투자된 전력콘덴서를 λ_Q 값이 취약한 모선으로 이동배치하면 계통손실은 더 감소한다[5]. 기설치된 전력콘덴서를 λ_Q 지표에 의하여 재배치할 경우 기본적으로 다음의 과정을 따른다.

- 가. 계통의 모든 전력콘덴서를 제거한다.
- 나. 전력콘덴서를 λ_Q 지표로 재배치한다.

6. λ 지표를 이용한 適正負荷遮斷

λ_P, λ_Q 지표는 모선전력의 미소량 변화에 대한 계통손실의 감도를 의미한다. 따라서 대용량 발전기의 탈락, 주요 선로사고 등 심각한 계통사고 발생에 따른 부하차단이 불가피 할 경우, λ_P, λ_Q 가 가장 민감한 모선으로 부터 차례로 부하를 차단한다면 부하차단에 따른 계통손실 효과를 극대화할 수 있으므로 계통의 전압안정도를 효과적으로 개선할 수 있다[6]. 여기서

$$\lambda_{SHED} = \sqrt{\lambda_P^2 + \lambda_Q^2} \tag{13}$$

로 표시되는 새로운 지표를 정의하고 계통의 부하차단이 불가피 할 경우 λ_{SHED} 가 가장 큰 모선으로 부터 $\Delta S = \Delta P + j\Delta Q$ (MVA) 만큼의 부하를 우선 차단한다. λ_{SHED} 지표에 의한 새로운 부하차단 알고리즘을 흐름도로 나타내면 그림 6과 같다.

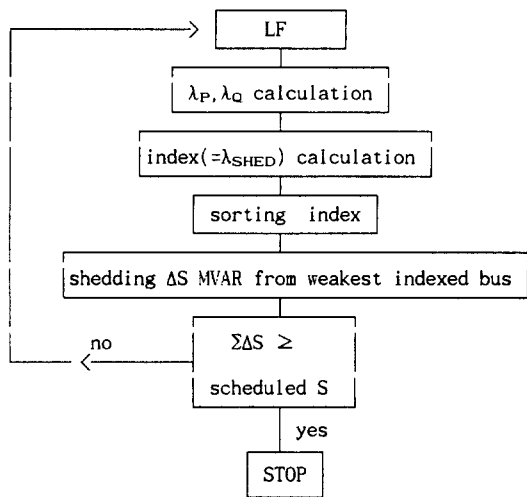


그림 6 λ_{SHED} 지표에 의한 부하차단 알고리즘
 Fig. 6 New load shedding algorithm based on λ_{SHED} index.

제시된 부하차단 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 그림 1과 유사한 모델계통을 예로 들어, 전압이 가장 낮은 모선으로 부터 $\Delta S = \Delta P + j\Delta Q$ 씩 차례로 부하를 차단하는 경우와 λ_{SHED} 값이 가장 큰 모선으로 부터 $\Delta S = \Delta P + j\Delta Q$ 씩 차례로 부하를 차단하는 두 경우에 대하여 계통손실과 전압분포를 표 6에 비교하였다.

5번 모선에 연결되어 3.5+j1.05의 전력을 공급하던 발전기 G_5 가 탈락되어 4.5번 부하모선의 전압이 0.7 p.u. 대로 크게 저하된 상황(base case)에서 계통의 전압안정도를 개선하기 위하여 $\Sigma \Delta S = \Sigma \Delta P + j \Sigma \Delta Q = 0.25$ p.u. 만큼의 부하차단이 필요하다고 가정하였다. 모선 1,3의 전압은 각각 1.04 및 1.02 p.u.로 일정하며 부하는 모두 일정역률의 정전력 부하로 가정하였다. 선로정수는 표 5와 같다.

표 5 선로정수
 Table 5 Line parameters

from	to	G(p.u.)	B(p.u.)	line charging
1	2	1.40056	-5.60224	Bus 1 0.03600 Bus 2 0.01800 Bus 3 0.08200 Bus 4 0.03575 Bus 5 0.03575
1	5	1.84118	-7.48352	
2	3	1.84118	-7.48352	
2	4	0.00000	0.00000	
2	5	0.00000	0.00000	
3	4	0.70028	-2.80112	
3	5	1.12985	-4.47675	
4	5	0.93372	-3.73483	

표 6 모선전압 및 λ_{SHED} 지표에 의한 부하차단 결과 비교

Table 6 Comparison of load shedding result by λ_{SHED} index with by bus voltage information

	base case before-shedding	Load shedding by Volt index	Load shedding by λ index
shed buses		bus4 0 bus5 .25+j.021	bus4 .043+j.018 bus5 .204+j.017
P_{LOSS}	0.9782	0.8115	0.8082
AVP	0.8083	0.8356	0.8366
V_2	0.9377	0.9422	0.9424
V_4	0.7851	0.8077	0.8147
V_5	0.7745	0.8075	0.8078
P_{g1}, Q_{g1}	6.0032+j2.6692	5.5865+j2.262	5.5849+j2.2607
P_2, Q_2	-1.15 -j0.6	-1.15 -j0.6	-1.15 -j0.6
P_{g3}, Q_{g3}	1.1 +j2.3713	1.1 +j2.079	1.1 +j2.0529
P_4, Q_4	-0.7 -j0.3	-0.7 -j0.3	-0.6563-j0.2813
P_5, Q_5	-4.275 -j0.3717	-4.0250-j0.350	-4.0704-j0.3540
P_{g5}, Q_{g5}	3.5 +j1.05	0	0
λ_{SHED2}	0.2919	0.2365	0.2350
λ_{SHED4}	0.8274	0.6262	0.6077
λ_{SHED5}	0.8408	0.6083	0.6077

표 6에 나타난 바와 같이 λ_{SHED} 지표에 의한 방법이 계통손실 및 전압분포 측면에서 전압정보에 의한 부하차단방식에 비하여 유리함을 알 수 있다. λ_{SHED} 지표는 계통손실을 최적화하는 부하차단 우선순위 정보를 제공함으로써 동일한 크기의 부하차단시 계통손실을 최적감소 시킬 수 있으며, 또한 계통손실의 크기가 동일할 경우 부하의 차단량을 최소화할 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 모선전력 변화에 대한 계통손실의 변화를 의미하는 계통손실 감도지표를 최적화 기법을 이용하여 유도하고 실계통의 아래와 같은 분야에 적용하는 방안을 제시하였다.

- 각 모선에 주어지는 손실감도지표 λ_P, λ_Q 는 전압붕괴점에서 ∞ 의 값을 가지며 계통 전압안정도의 평균지표로 활용할 수 있다.
- 무효전력설비를 신규투자 할 경우, 모선별로 연산된 λ_Q 지표를 이용하여 최적모선과 용량을 지정함으로써 계통의 전력손실과 전압안정도를 최대한 개선할 수 있다.
- 계통망 구성과 부하의 변화에 따라 기존 무효전력설비의 투자위치와 용량이 적정하지 않다면 재검토할 필요가 있을 경우 λ_Q 지표를 이용하여 최적모선과 용량을 재지정할 수 있다.
- 심각한 계통사고의 발생으로 부하차단이 불가피 할 경우, λ 지표를 이용하여 부하를 최적 차단함으로써 부하차단량을 최소화하고 계통손실과 전압안정도를 최대한 개선할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Mokhtars Bazaraa and C.M.Shetty "Non- linear Programming Theory and Algorithms", John Wiley & Sons Inc. 1979.
- [2] 김건중, 심국진, 정태호, 이상중, "실시간 전압붕괴 근접도", 대한전기학회 전력계통연구회 논문집, pp 51-55, 1991. 4.
- [3] 김건중, 김원경, 정태호, 이상중, "전압안정도 개선을 위한 무효전력제어", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 422-425, 1991. 8.
- [4] 이상중, 김건중, 김원경, 김용배, 엄재선 "피상전력 손실감도 지표에 근거한 전압붕괴 근접도지표와 무효전력 투자" 전기학회 논문지 44-10-8 1995.10월호, pp 1290-1294
- [5] 이상중, 정태호, 김건중, 김원경, 김용배 "계통손실 감소를 위한 전력용 콘덴서의 적정 재배치에 대한 연구" 전기학회 논문지 44-1-4 1995.1월호 pp 21-24
- [6] 이상중, 김건중, 김원경, 김용배, "전압 안정도 개선을 고려한 적정 부하차단 기법", 전기학회 논문지 44-3-2, 1995. 3월호 pp 270-273

저 자 소 개



이 상 중 (李 尙 中)

1955년생. 1983년 성균관대 전기공학과(졸업). 1976년 한국전력공사 입사. 1987년 전력연구원 계통연구실. 1995년 전력연구원 수화력발전연구실 부장. 1996년 한국전력 보령화력본부 부장. 1998년 서울산업대 전기공학과 전임강사

Tel : 02-970-6411

E-mail : sjlee@duck.snut.ac.kr