

손실감소를 통한 고속철도부하를 포함한 154[kV] 배전계통의 시스템 안정도 평가

(Assessment of System Stability via Loss Reduction
in 154[kV] System Supplying High Speed Railway)

정현수* · 오재경 · 김진오

(Hyun - Soo Jung · Jae - Kyoung Oh · Jin - O Kim)

요 약

고도의 산업화에 따른 물류량의 증가와 인구 도시집중 현상은 교통난을 더욱 더 심화시키고 있으며 수송효율성 향상 대책으로서 전기철도가 새롭게 부각되고 있다. 특히 전기철도는 수송력이 월등히 높고 안전성 및 신속성과 친환경적인 요소로 인해 세계 각국에서 미래 교통문제 해결의 최선의 대안으로 제시되고 있다. 우리나라 역시 경부고속전철사업이 추진중이며, 300[km/h]급의 서비스가 개시될 예정이다. 일반적으로 송·배전 계통은 3상 평형부하인 반면에 전기철도 부하는 단상 대용량 집중부하로서 이동과 정지가 빈번하고 부하변동이 극심한 전기적 특성을 가지고 있기 때문에, 우리나라 154[kV] 계통은 단락용량이 크에도 불구하고 시스템의 안정도 평가는 필요하다 하겠다. 본 논문에서는 수식적으로 유도된 안정도 지수를 통한 시스템 안정도를 평가하고 시스템 안정도와 전력손실의 관계를 제시하였다. 또한 사례연구에서는 PSS/E를 활용하여 병렬 무효전력보상기기를 우리나라 154[kV] 계통에 적용하여 손실 감소를 통한 시스템 안정도 향상을 입증하였다.

Abstract

The purpose of this paper is to assess experimentally system stability of the 154[kV] transmission system due to the current of the forthcoming AC High-Speed Railway (HSR) era. It introduces a simple method to evaluate the system stability. The proposed method also shows the relationship between stability and power losses, and the stability indices made by the numerical process proposed in this paper will be used to assess whether a system can be stabilized or not. This paper also presents the improvement of the stability via loss reduction using a shunt compensator. Reactive power compensation is often the most effective way to improve both power transfer capability and system stability. The suitable modeling of the traction power system should be applicable to the PSS/E. The proposed method is tested on a practical system which will be expected to accommodate the heavy HSR load.

Key Words : System stability, AC High-Speed Railway

* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 박사과정
Tel : 02-2290-0347. Fax : 02-2297-1569
E-mail : hsjung50@hanmail.net
접수일자 : 2002년 7월 24일
1차 심사 : 2002년 7월 29일
심사완료 : 2002년 8월 29일

1. 서 론

오늘날 전기수요의 증가와 산업의 발달에 따른 전력계통의 안정도에 대한 많은 우려의 관심이 높아지

손실감소를 통한 고속철도부하를 포함한 154[kV] 배전계통의 시스템 안정도 평가

고 있다. 이론적으로 발전소의 건설은 부하 밀집지역에 근접한 곳이 바람직하지만 현실적인 어려움으로 부하 밀집지역과 거리가 멀리 떨어져있다. 이러한 전원의 편재는 계통의 무효전력의 불균형 수급과 부하단의 전압 강하의 문제를 야기하며, 지속적인 부하의 증가가 시스템 전체에 이상현상으로 과급될 수 있는 위험을 내포하고 있다.

전기철도는 주행과 정지가 빈번한 대용량의 부하이며, 시·공간적으로 크기가 급변하기 때문에 전기철도 부하를 담당하게 될 154[kV] 계통의 안정도 평가는 고려될 가치가 충분하다고 하겠다. 본 논문에서는 발전량과 부하량, 그리고 계통의 전력 손실과의 관계를 이용한 시스템 안정도 지수 [2][3]을 이용하여 전기철도 부하를 포함한 전력계통의 안정도를 평가하였다. 우선 안정도 평가에 앞서 전기철도 시스템의 모델링이 우선시 된다. 154[kV] 이하의 배전계통 부하를 합하여 하나의 거대한 부하로 본다면 정교한 안정도 평가는 불가능하다. 따라서 전기철도 부하의 구성과 특성을 파악하여 154[kV] 이하 배전시스템에 적용하여야 한다.

전기 철도 급전시스템은 3상을 단상으로 변환하는 스코트 변압기 통해 154[kV]를 55[kV]로 변압하는 변전설비와 55[kV]-27.5[kV]용 단권변압기와 급전선과 전차선, 레일을 포함한 급전설비, 그리고 열차, 3개의 부분으로 볼 수 있으며 전철 변전소는 50[km] 구간마다 설치되며, 매 구간마다 단권변압기는 10[km] 간격으로 설치된다. 우리나라에 도입되는 한국형 고속전기철도는 300[km/h]로 운행될 예정이며, 많은 전력소모가 예상되므로 15+j3[MVA]의 정전력부하로 모델링하였다.

2. 본 론

2.1 시스템 안정도 분석

그림 1은 일반적인 송전선로의 등가회로를 나타내며 송전단측 유효전력 P_s 와 무효전력 Q_s 는 수전단측 유효전력 P_r , 무효전력 Q_r 과 다음과 같은 관계를 가진다[1].

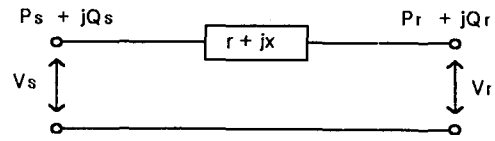


그림 1. 송전선로 단선도
Fig. 1. One-line diagram of transmission line

$$P_s = \frac{r(P_s^2 + Q_s^2)}{V_r^2} + P_r \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{x(P_s^2 + Q_s^2)}{V_r^2} + Q_r \quad (2)$$

식 (1), (2)의 $\frac{r(P_s^2 + Q_s^2)}{V_r^2}$ 부분을 소거하여 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$x(P_s - P_r) = r(Q_s - Q_r) \quad (3)$$

식 (3)을 식 (1)에 대입하여 P_s 에 대한 이차식을 구하면

$$(r^2 + x^2)P_s^2 - (2x^2P_r - 2rxQ_r + r)P_s + (x^2P_r^2 + r^2Q_r^2 - 2rxP_rQ_r + rP_r) = 0 \quad (4)$$

식 (4)를 풀어 P_s 의 해를 구하면

$$P_s = \frac{(2x^2P_r - 2rxQ_r + r)}{2(r^2 + x^2)} \pm \frac{\sqrt{D_P}}{2(r^2 + x^2)} \quad (5)$$

여기서

$$D_P = (2x^2P_r - 2rxQ_r + r)^2 - 4(r^2 + x^2) \times (x^2P_r^2 + r^2Q_r^2 - 2rxP_rQ_r + rP_r) > 0 \quad (6)$$

식 (5)에서 P_s 가 실근을 갖기 위한 조건은 D_P 가 0보다 큰 값을 가져야 한다. Q_s 에 대해서도 동일한 과정을 통해 식 (7)을 유도할 수 있다.

$$D_Q = (2r^2Q_r - 2rxP_r + x)^2 - 4(r^2 + x^2) \times (r^2Q_r^2 + x^2P_r^2 - 2rxP_rQ_r + xQ_r) > 0 \quad (7)$$

부등식 식 (6)과 (7)을 통해 식 (8)을 구할 수 있다.

$$4[(xP_r - rQ_r)^2 + xQ_r + rP_r] < 1.0 \quad (8)$$

식 (8)은 시스템이 안정하기 위한 필요 충분 조건이라 할 수 있다. 만약 식 (6)과 (7)이 0보다 작다면 P_S 와 Q_S 는 허수값을 가지는데, 이것은 물리적으로 불가능하며, 시스템이 이상 상태로 운행됨을 의미한다. [3] 그리하여, 결과적으로 본 논문에서는 식 (8)을 전체 계통에 적용하여 시스템 안정도를 판별하는 지수 L로서 채택하였다.

$$L = 4[(x_{eq}P_{teq} - r_{eq}Q_{teq})^2 + x_{eq}Q_{teq} + r_{eq}P_{teq}] < 1.0$$

여기서 r_{eq} , x_{eq} 는 시스템 등가저항과 등가리액턴스를 나타내며, P_{teq} 와 Q_{teq} 는 각각 총 유효전력부하 [MW]와 총 무효전력부하[MVAR]를 나타낸다.

시스템 안정도 지수는 시스템이 임계점에서 운행시 최대값 1.0을 가지게 되며, 1.0에 근접할수록 시스템은 불안정하다는 것을 나타낸다. 그러므로 안정도 지수 L은 부하 증가시의 시스템 안정성 평가예측으로 적용 가능하다.

2.2 시스템 안정도와 전력손실과의 관계

앞에서 논한 바로, 시스템 안정도는 전력손실과 밀접한 관계를 가진다[4][5]. 시스템 안정도 지수 L의 r_{eq} , x_{eq} 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$r_{eq} = \frac{\sum P_{loss}}{(P_{teq} + \sum P_{loss})^2 + (Q_{teq} + \sum Q_{loss})^2} \quad (9)$$

$$x_{eq} = \frac{\sum Q_{loss}}{(P_{teq} + \sum P_{loss})^2 + (Q_{teq} + \sum Q_{loss})^2} \quad (10)$$

식 (9)와 (10)에서 분모 부분은 총 발전량이며, 분자부분은 총 전력손실로서 전력조류계산으로서 구할 수 있는데 시스템 안정도는 전력손실과 밀접한 관계를 가지는 것을 보이며, 손실의 증가는 시스템 안정도 지수 L의 증가를 가져온다.

조명 · 전기설비학회논문지 제16권 제5호, 2002년 9월

2.3 병렬 무효전력 보상기에 의한 손실 감소

송전시스템에서 병렬 무효전력 보상기를 설치하는 궁극적인 목적은 송전선로의 전기적 특성을 바꿈으로서 리액터로 경부하시 과전압을 최소화하여 선로를 보호하고, 커패시터로서 과부하시 전압레벨을 유지시켜 부하수요를 만족시키며 전송전력을 증가시키기 위함이다.

또한 정상상태 송전특성 뿐만 아니라 부하의 증가에 따른 시스템 안정도를 개선시키며, 전압 조정기도 사용되어 송전 선로 중간과 말단에 설치되어 전압 불안정을 막을 뿐만 아니라 과도 안정도를 증가시키고 전력 동요를 감소시킬 수 있다.

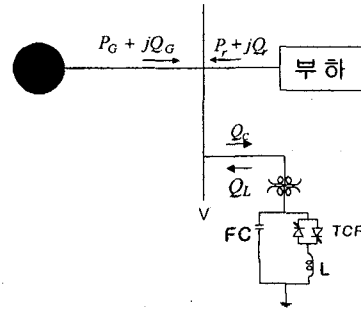


그림 2. 병렬 무효전력 보상기
Fig. 2. Static var device

그림 2는 모선전압을 일정하게 조절할 수 있도록 부하와 병렬로 선로에 병렬 무효전력 보상기를 설치한 단선도이다. 병렬 무효전력 보상기를 통해 공급하는 무효전력을 Q_C 라고 하면, 이 값과 부하의 무효전력 Q_r 의 합은 공급단의 무효전력 Q_S 와 동일하다. 모선에서 부하단까지 흐르는 전류를 I 라 하면, 송전선로에서의 손실은 $I^2 r$, $I^2 x$ 라 할 수 있다. 이때의 I^2 은 식 (11)과 같다.

$$I^2 = I \cdot \bar{I} = \frac{P_r^2 + Q_r^2}{V_r^2} \quad (11)$$

앞에서 언급한 바와 같이 손실감소는 시스템 안정도 유지의 핵심적인 요소이며 병렬 무효전력 보상기

손실감소를 통한 고속철도부하를 포함한 154[kV] 배전계통의 시스템 안정도 평가

를 이용하여 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다[1].

첫째로 무효성분에 의한 손실감소이다. 병렬 무효 전력 보상기의 설치로 인해 선로의 전류 I 를 감소시킬 수 있으며 기대되는 손실 감소량 $\Delta P, \Delta Q$ 는 다음과 같으며, 여기서 Q_C 는 무효전력보상기의 용량을 나타낸다.

$$\Delta P = r \cdot \frac{P_r^2 + (Q_r^2 - Q_C^2)^2}{V_r^2} \quad (12)$$

$$\Delta Q = x \cdot \frac{P_r^2 + (Q_r^2 - Q_C^2)^2}{V_r^2} \quad (13)$$

두 번째로 병렬 무효전력 보상기의 설치를 통해 다음 식 (14)와 같이 전압강하의 저감 V_d 를 기대할 수 있다.

$$V_d = \frac{1}{V_r} \cdot [rP_r + x(Q_r - Q_C)] \quad (14)$$

2.4 고속철도 시스템 모델링

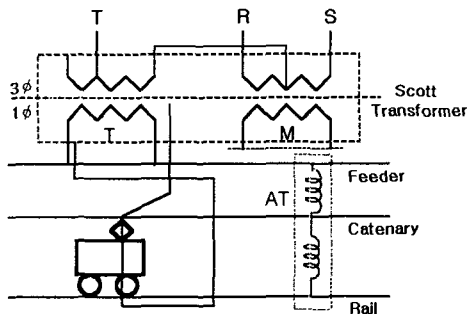


그림 3. 고속철도 시스템의 구성
Fig. 3. The traction power system

그림 3은 고속철도 시스템을 간략화한 단선도이며 각각의 선로정수는 상수 변환을 통해 식 (15)와 같이 재구성되었다[7][8]. 또한, 단권변압기의 누설 리액터를 무시하고 식 (16)으로 상수 변환하였다. 그림 4는 다음과 같은 과정을 통한 간략화된 고속철도 시스템을 나타낸다.

1) 원래의 선로정수

Z_{aa}, Z_{bb}, Z_{cc} : T(전차선), R(레일), F(급전선)의 자기 임피던스[Ω/km]

Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} : T-R, R-F, F-T간의 상호 임피던스[Ω/km]

Z_g : A.T의 누설 임피던스[Ω/km]

2) 등가회로의 선로정수

$$Z_A = Z_{aa}$$

$$Z_B = Z_{bb}$$

$$Z_C = \frac{Z_{cc} + Z_{ca} + Z_{aa}}{4} \quad (15)$$

$$Z_{AB} = Z_{ab}$$

$$Z_{CA} = \frac{(Z_{bc} + Z_{ab})}{2}$$

$$Z_{BC} = \frac{(Z_{ca} + Z_{aa})}{2}$$

$$Z_1 = Z_A + Z_{BC} - Z_{AB} - Z_{CA}$$

$$Z_2 = Z_B + Z_{CA} - Z_{BC} - Z_{AB} \quad (16)$$

$$Z_3 = Z_C + Z_{AB} - Z_{CA} - Z_{BC}$$

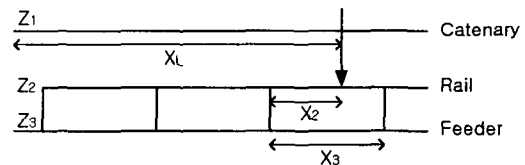


그림 4. 간략화된 고속철도 시스템
Fig. 4. Simplified traction power system

그림 4로부터 열차위치까지의 총 선로임피던스 Z_L 을 구하면 식 (17)과 같다.

$$Z_L = \left(Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) X_L + \frac{Z_2^2}{Z_2 + Z_3} \left(1 - \frac{X_2}{X_3} \right) X_2 \quad (17)$$

3. 사례 연구

우리나라에 건설될 전철변전소 오송과 봉양구간 (109.55[km])을 모델 계통으로 선정하였으며, 154[kV] 충주와 증평 변전소가 이 구간을 담당할 예정이다. 급전구간은 각각 58.77[km], 50.78[km]이다.

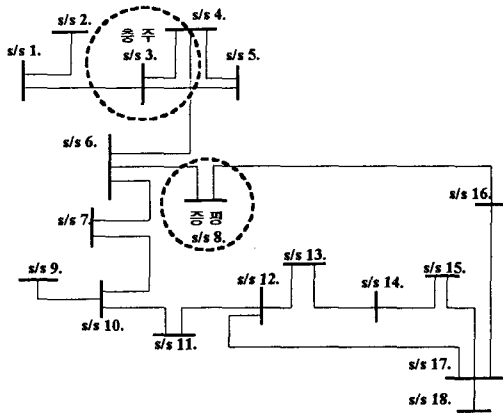


그림 5. 모델계통 구성도
Fig. 5. One-line diagram for model system

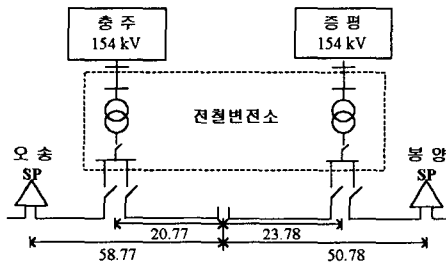


그림 6. 전기철도 급전계획
Fig. 6. Traction power supply scheme

신뢰도 측면에서 전기철도 급전원은 서로 다른 2개의 154[kV] 변전소에서 상시·비상시로 연계되어 운행되는 것이 최선이다. 그러나 각각의 154[kV] 변전소는 서로 멀리 떨어져 있기 때문에 송전선의 신설을 필요로 하나, 경제적인 면으로 그림 6과 같은 차선책을 선택하였다.

그림 6은 변전소 고장 시, 인근의 변전소가 고장 변전소의 전철부하 공급구간의 절반을 담당할 수 있도록 1전원 2회선 수전방식으로 연장급전을 가능하게 하였다. 그림 7은 전력조류계산을 위해 등가화된 전기철도 시스템을 나타낸다.

제안된 등가화 기법에서 사용된 가정은 다음과 같다.

- 1) Distribution lines : 전철변전소의 스코트 변압기와 단권변압기의 임피던스는 선로임피던스에 포

함시켜 축약하고 전기철도 계통을 3상 배전 계통으로 모의한다.

- 2) Branches : 전차 사이의 간격은 4분 시격으로 간주하여 12[km]로 가정하였으며, 식(14)에 의해 급전선, 전차선, 레일로 구성된 급전회로는 총 임피던스로 등가화 되어 각각의 전차 사이의 선로 임피던스로 산정하여 3상 배전계통으로 변환하여 모의한다.

- 3) Buses : 열차의 위치를 모선으로 가정하였으며, 각각의 부하모선은 $15+j3$ [MVA]의 정전력부하로 가정한다[6].

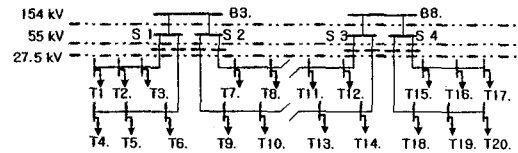


그림 7. 전기철도 시스템의 등가화
Fig. 7. The equivalent diagram of the HSR

PSS/E 프로그램은 3상 송전계통 조류계산용으로 많이 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 전기철도 급전계통을 3상 계통에서 모의가 가능하도록 선로임피던스와 변압기를 등가화하여 송전계통의 다음과 같은 과정을 통하여 안정도 평가를 실시하였다.

- 1) 2002년도 최대부하 데이터(한국전력 제공)를 통해 초기치 산정
- 2) 전기철도 부하를 연계하지 않은 상태에서 초기 시스템 안정도 평가
- 3) 모선 3, 8에 전기철도 부하 연계시 시스템 안정도 평가
- 4) 정상급전시와 연장급전시의 시스템 안정도 계수 비교
- 5) 무효전력보상기기의 설치시의 전압과 시스템 안정도 향상 분석

4. 결과 및 분석

표 1은 정상급전시의 Case 1과 전철 변전소 고장시의 인근 변전소의 연장급전시의 Case 2 (충주), Case

손실감소를 통한 고속철도부하를 포함한 154[kV] 배전계통의 시스템 안정도 평가

표 1. 각각의 경우 시뮬레이션 결과
Table 1. The summary of the simulation result

Case 1		정상급전				
Without compensator		With compensator				
Voltage		Losses		Voltage		Losses
Level	Branches	MW	MVAR	Level	MW	MVAR
154.0	47	20.15	272.05	154.0	18.76	249.27
55.0	4	0.14	0.94	55.0	0.12	0.85
27.5	28	4.73	29.58	27.5	4.25	27.36
Total	79	25.02	302.57		23.13	277.47
Case 2		충주변전소 연장 급전				
Without compensator		With compensator				
Voltage		Losses		Voltage		Losses
Level	Branches	MW	MVAR	Level	MW	MVAR
154.0	47	17.13	285.02	154.0	17.17	266.03
55.0	2	0.03	2.19	55.0	0.03	1.91
27.5	18	5.20	19.42	27.5	4.77	16.83
Total	67	22.37	306.63		21.97	284.76
Case 3		증평변전소 연장 급전				
Without compensator		With compensator				
Voltage		Losses		Voltage		Losses
Level	Branches	MW	MVAR	Level	MW	MVAR
154.0	47	21.89	230.97	154.0	20.66	230.18
55.0	2	0.40	0.65	55.0	0.35	0.60
27.5	18	22.71	71.91	27.5	19.55	66.24
Total	67	45.00	303.54		40.55	297.03

3 (증평)의 각각의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 부하의 증가는 더 많은 무효전력을 요구하게 되며, 무효전력 손실도 증가함을 보였다. 또한 연장급전시의 총 손실은 정상급전시 보다 크다. 전압레벨 27.5[kV]의 전기철도 부하에서 무효전력 손실이 증가하는데 열차의 수전 전압은 전철의 급전거리의 증가로 인하여 선로 전류의 증가를 가져왔으며, 이로 인한 손실의 증가와 전압강하가 발생하였다.

Case 2의 전압레벨 27.5[kV]의 전철부하에서의 무효전력 손실은 현저히 작는데 비해 Case 3의 무효전력 손실이 정상급전시 보다 큰 상승을 보인다. 이는 Case 2의 경우 충주변전소에서 전철변전소 수전점까지의 급전거리 0.5[km]에 비해 증평변전소는 4.5[km]이기 때문이며, 충주변전소 인근의 수력발전소가 무효전력의 부족분을 보상하기 위해 발전량이 증가하였기 때문이다.

일반적으로 병렬 무효전력 보상은 전류의 무효

성분에 의해 보상되므로 유효전력의 보상은 극히 적게 나타났다.

표 2는 손실의 감소비와 그에 따른 시스템 안정도 지수의 변화를 보여준다. Case 2인 경우의 감소비는 Case 3에 비해 크며, 안정도 지수도 더 낮은 것을 알 수 있다.

표 2. 손실 감소비와 안정도 지수
Table 2. The loss reduction ratio and stability indices in each case

	MW	MVAR	보상전	보상후
Case 1	7.55 %	8.29 %	0.355	0.321
Case 2	9.89 %	7.13 %	0.352	0.343
Case 3	1.79 %	2.14 %	0.393	0.358

병렬 무효전력 보상의 용량은 충주와 증평의 154 [kV] 변전소의 단락용량 5,889 [MVA], 3,798 [MVA]

을 고려하여 100 [MVA]로 산정하였다.

그림 8은 연장급전시 모선 3번과 8번에서 열차 운행 대수를 14대까지 증가 시켰을 경우, 병렬 무효전력 보상기의 유·무에 따른 시스템 안정도 지수의 증가 곡선을 나타낸다. 결과적으로 병렬 무효전력 보상기를 설치하여 최대 안정도 지수를 0.034까지 감소 가능하였다.

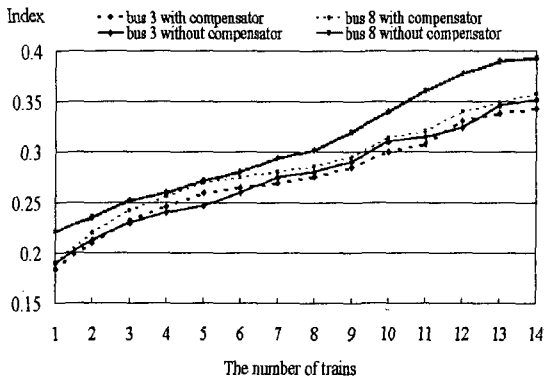


그림 8. 열차운행대수에 따른 안정도 지수
Fig 8. The variation of system stability indices

5. 결 론

신뢰성 있는 안전한 시스템을 운용하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 부하에 시스템이 대응 가능한가를 다양한 상정사고를 가정하여 평가해 보아야 한다. 오늘날 전력계통은 포화상태에 있다고 해도 과언이 아니며, 작은 부하라도 지속적인 증가는 시스템을 불안정한 상태로 이끌 수 있다.

전기철도 부하와 같은 대용량의 이동부하를 담당하는 계통은 선로용량 포화와 지역적으로 무효전력의 부족현상을 발생시킬 가능성이 크다고 하겠다. 그러므로, 체계적이며 빠른 시스템 안정도 평가 방법과 적절한 보상대책은 필수 불가결한 요소라 할 수 있다.

본 논문에서는 전기철도부하를 전력조류계산에 적용 가능하도록 모델링하였고, 뉴턴-랩슨법을 적용한 전력조류계산 결과의 출력 데이터를 이용한 시스템 안정도 해석과 불안정 예측방법을 제시하였다. 또한 수식적으로 전력손실과 시스템 안정도의 관계를 입증하였으며, 병렬 무효전력 보상기의 투입에 따른 전

력손실의 감소와 이에 기인한 시스템 안정도의 향상을 사례연구를 통해 입증하였다.

References

- (1) Carson W. Taylor, "Power System Voltage Stability", 1994 by McGraw Hill Inc.
- (2) M. Moghavvemi, F.M. Omar, "Technique for contingency monitoring and voltage collapse prediction", IEE Proce-Gener, Transm, Distrib, Vol 145No. 6, November 1998.
- (3) M. Moghavvemi, M. O. Faruque, "Technique for Assessment of Voltage Stability in ill-conditioned Radial Distribution Network", IEEE Power Engineering Review, January 2001.
- (4) MA. Kashem, Mahmoud Moghavvemi, "Maximizing Radial Voltage Stability and Load Balancing Via Loss minimization in Distribution Network", Energy Management and Power Delivery, 1998. Proceedings of EMPD '98. 1999 International Conference on, Volume 1, 1998.
- (5) Abdel-Salam, T.S. Chikhani, A.Y. Hackam, R. "A new technique for loss reduction using compensating capacitors applied to distribution systems with varying load condition", Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 9 Issue 2, April 1994.
- (6) Bhargava, B, "Railway electrification systems and configurations", Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE, Volume 1, 1999.
- (7) 한국고속철도 건설공단, "고속철도 연구보고서 (전기 분야)", 1996. 2.
- (8) 한국전기연구소, "급전시스템 해석기술 개발", pp 26-50, 1999. 10.

◇ 저자소개 ◇

정 현 수 (鄭鉉洙)

1950년 8월 13일생. 1974년 전남대학교 전기공학과 졸업, 1988년 한양대학교대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 한양대학교 전기공학과 박사과정.

오 재 경 (吳載景)

1973년 10월 28일생. 2000년 서울산업대학교 전기공학과 졸업, 현재 한양대학교 전기공학과 석사과정.

김 진 오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(박사), 현재 한양대학교 공과대학 전기공학과 부교수.