

기존선 해빙시스템을 위한 해빙전류 예측기법 및 구성 절차에 관한 연구

A Study on Deicing Current Estimation Technique and Configuration Process for Deicing System in the Conventional Line

정호성* · 권상영* · 박 영**

Hosung Jung · Samyoung Kwon · Young Park

Abstract

Deicing system is to melt frost or ice freezed in catenary line when the temperature is lower than 0°C in winter. The principle of deicing system is to melt frost or ice by Joule heat of catenary impedance. The performance of deicing is dependant of deicing current determined by the length of deicing section, deicing impedance and current division ratio of catenary line and messenger line. So, we present technique for estimating deicing current and process for determination of deicing section in the conventional line. Deicing impedance is estimated using Carson-Pollaczek equation, and current division ratio of catenary line and messenger line is estimated using voltage drop, and deicing current is estimated using power system data of deicing system. For the determination of the final deicing section, we verified estimated value comparing with experiment value of deicing impedance and current division ratio of catenary line and messenger line using low voltage experiment. Finally, we verified the validity of estimation technique and process using a simulated test data of real deicing system operation in the Chungju Substation, Chungbuk line.

Keywords : Deicing system(해빙시스템), Deicing Current Estimation(해빙전류 예측), Configuration Process(구성 절차), Conventional Line(기존선)

1. 서론

동절기에 전차선로 주변의 온도가 0°C 이하가 되는 경우 가공 전차선에 서리 또는 결빙이 형성될 수 있으며, 이러한 상태에서 차량이 운행하면 팬터그래프의 습동판과 전차선 사이에 절연물이 개입되고 이로 인해 아크가 발생하게 된다. 이러한 아크는 팬터그래프 접촉 스트립을 손상시키고 집전전류의 품질을 저하시켜 열차의 안전운행에 지장을 초래하게 된다. 또한 팬터그래프 습동판과 전차선 사이에 발생하는 아크는 전자파를 발생시켜 선로 주변의 통신선과 인체에도 영향을 줄 우려가 있다.

경부고속철도 고속선에서는 동절기 전차선에 발생하는 서리 및 결빙을 제거하기 위해서 해빙시스템을 도입하여 운영 중에 있다. 해빙시스템은 본선 전차선을 이용하여 해당

구간에 임의의 폐회로를 형성하고, 폐회로에 일정 전류를 흘려주어 발생하는 Joule열(전류저항에 의한 발열)에 의해 서리나 결빙을 녹이고 건조하여 전차선의 결빙 형성을 제거하는 시스템이다. 이러한 해빙시스템에서의 서리 및 결빙을 제거하기 위한 Joule열은 해빙을 위해 구성된 임의의 폐회로에 흐르는 해빙전류와 전차선의 임피던스 크기에 좌우된다. 따라서 기존선에 해빙시스템을 설치하는 경우에는 이미 설비의 구성이 완료되어 있어 해빙시스템에 흐르는 전류량을 제어하기 위한 별도의 설비 추가가 어렵게 된다. 그러므로 해빙회로의 임피던스 크기와 전차선에 흐르는 해빙전류의 크기를 정확하게 예측하는 것이 해빙시스템의 성능을 좌우하게 된다.

따라서 본 논문에서는 기존선 해빙시스템 구성을 위한 해빙 임피던스와 해빙전류 예측기법과 해빙 임피던스 실측시험을 통해 해빙구간 선정을 위한 절차를 제시하였다. 또한 충북선 충주변전소의 해빙시스템 구성을 위해 제시한 절차에 따라 해빙시스템을 구성하고 실제 운영될 해빙시스템 모의시험을 수행하여 제시한 해빙전류 예측기법의 타당성과

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부
E-mail : hsjung@krti.re.kr

TEL : (031)460-5116 FAX : (031)460-5459

* 정희원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부

** 정희원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부

충주변전소 해빙시스템 구성의 안전성을 검증하였다.

2. 고속선 해빙시스템 원리

고속선 해빙시스템은 경부고속철도 건설시 프랑스 기술에 의해 도입되었다. 고속선 해빙시스템은 전차선을 이용하여 일정 구간의 폐회로를 구성하고 전차선에 전류를 흘려보내 Joule열에 의해 서리 또는 결빙을 녹이는 원리이다. 현재 서울-동대구 고속선 구간에 해빙시스템이 설치되어 있으며 각 구간의 서리감지를 위하여 서리 감지 센서가 설치되어 있다. 고속선 해빙시스템의 운영은 서리발생이 감지되면 전동차 운행이 시작하기 전에 임의의 폐회로를 구성하고 변전소에서 전차선로로 전력을 공급함으로써 실행된다[1,2].

그림 1은 고속선 해빙시스템 해빙회로의 구성을 나타낸 것이다. 그림 1과 같이 해빙회로는 변전소를 중심으로 양쪽 급전구분소 간에 전차선만을 이용한 폐회로를 구성한다. 해빙회로에 전력을 공급하기 위한 변전소 AT(단권변압기)를 제외한 해빙회로내의 변전소, 급전구분소, 병렬구분소의 모든 AT를 분리하고 양 급전구분소의 상하타이차단기를 투입하여 상, 하선 전차선을 연결하며 그리고 변전소에서는 방면별 절연구간을 연결해주는 단로기와 전차선과 전원공급용 AT중성점인 접지를 연결해주는 단로기를 투입하여 전체적인 해빙시스템을 위한 폐회로가 구성된다.

경부고속철도에 설치된 해빙시스템은 0°C 부근에서 발생한 서리를 녹이기 위해 전차선 온도를 10°C로 상승시키기 위해 대략 15분간 운전하고 있다. 해빙전류 크기는 최대 1000A 이내로 제한되고 있으며, 해빙시스템은 구간에 따라 차이가 있으나, 전반적으로 해빙회로의 길이는 50km 정도이며, 해빙전류는 대략 700A 정도가 흐른다.

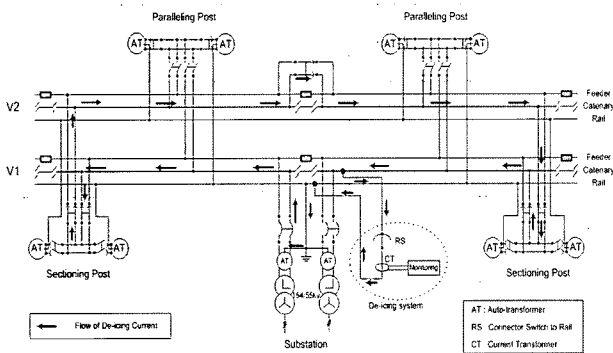


그림 1. 고속선 해빙시스템 구성도

3. 해빙전류 예측기법 및 시험

해빙시스템의 성능을 좌우하는 것은 해빙회로에 흐르는 해빙전류의 크기이다. 해빙회로 전류의 크기가 너무 작은 경우에는 해빙효과를 기대할 수 없으며, 반대로 해빙전류가 매우 큰 경우에는 단시간에 해빙효과를 기대할 수 있으나 전차선의 허용전류를 초과할 우려가 있으며, 전차선 길이팽창으로 인한 기존의 타 설비의 안전에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 해빙전류가 전차선 허용전류 이상으로 흐르는 경우에는 해빙용 변압기, 저항기 등의 전류제한장치를 추가적으로 설치하거나 해빙회로 구간을 연장해야만 한다. 하지만 기존선의 경우에는 해빙전류를 제한하기 위한 추가적인 설비를 구축하기에 어려움이 있기 때문에 해빙회로의 재구성을 검토해야만 한다. 이와 같이 안전한 해빙시스템을 구성하기 위해서는 해빙전류의 예측이 정확해야 하며, 이를 위해서는 해빙임피던스 예측과 이를 검증하기 위한 해빙 임피던스 실측이 요구된다. 그림 2는 본 논문에서 제시한 기존선 해빙시스템 구성을 위한 절차를 제시한 것이다. 먼저 기존선 해빙구간이 선정되면 선로 임피던스 예측에 널리 적용중인 같은-폴라чек 식을 이용하여 해당 구간의 선중 및 선로구성에 따라 해빙 임피던스를 예측한다. 그리고 예측된 해빙구간의 임피던스와 전원계통 데이터를 이용하여 해빙전류를 예측한다. 다만 해빙전류는 전차선로로 구성된 폐회로에 전류가 흐르게 되므로 전차선뿐만 아니라 조가선에도 전류

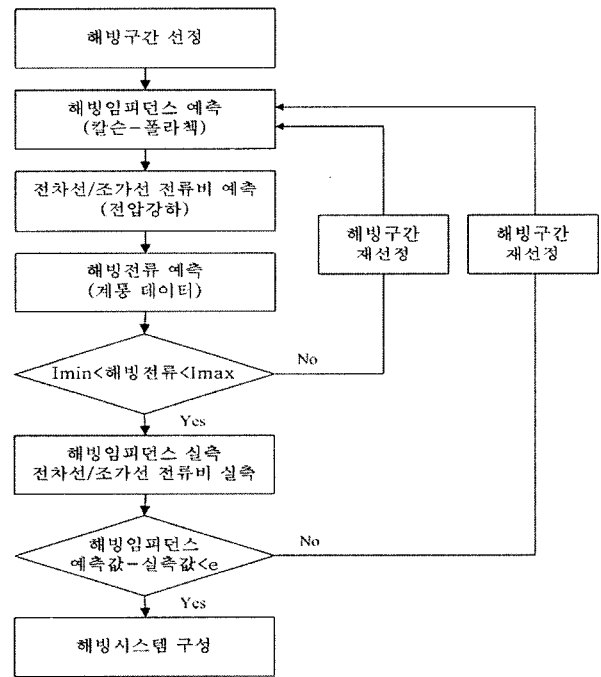


그림 2. 해빙시스템 구성 절차 순서도

가 흐르게 된다. 전차선과 조가선은 선종이 달라 흐르는 전류분포가 다르므로 전차선과 조가선의 전류 분포를 정확히 예측하는 것이 전차선의 해빙효과 및 선로 길이팽창으로 인한 타 설비의 영향을 예상할 수 있다. 최종적으로 예측된 전차선에 흐르는 해빙전류의 크기가 너무 작거나 큰 경우에는 해빙회로 구성 구간의 조정이 필요하다. 여기서 최대 전류(I_{max})와 최소 전류(I_{min})는 해빙 구간의 길이, 사용된 선종 등이 구간에 따라 다르게 된다. 다만 최소 전류는 해빙효과를 나타낼 수 있는 크기 이상으로 선정하고 최대 전류는 해당구간의 연속허용전류 이내의 크기로 선정하는 것이 바람직하다.

해빙 임피던스 예측값은 전차선로의 표준장주도를 대상으로 예측하였기 때문에 실제값과는 차이가 발생할 수 있어 해빙 임피던스 실측을 통한 검증이 요구된다. 따라서 그림 3과 같이 실제 해빙 임피던스 예측을 위한 회로를 구성하고 저압의 전압을 공급함으로써 실제 해빙임피던스를 실측한다. 또한 해빙 임피던스 실측 과정에서 그림 4와 같이 전차선과 조가선에 전류크기를 측정함으로써 전차선과 조가선의 전류분류비도 측정할 수 있다. 이와 같이 실측된 해빙 임피던스의 크기와 예측된 해빙 임피던스의 크기가 일정크기의 허용값 이내인 경우에는 실제로 안전한 해빙시스템을 구

성할 수 있다[3,4].

4. 사례 연구

4.1 충주변전소 해빙시스템 구성

본 논문에서 제시한 해빙시스템 구성의 타당성을 검증하기 위해서 충북선 충주변전소 구간에 대해 해빙시스템을 구성하고 예측기법과 모의시험을 수행하였다. 충북선 충주변전소 해빙시스템은 그림 5와 같이 충주변전소를 기준으로 음성 급전구분소에서 봉양 급전구분소까지 50.79km로 구성하였다. 해빙회로 구성을 위해 충주변전소에 연결구간 연결용 단로기와 전차선과 AT중성점 연결용 단로기를 추가 설치하였으며, 해빙시스템 운영을 위해 양 급전구분소의 상하타이차단기를 투입하였으며, 전력공급용 AT를 제외한 모든 구간의 AT는 분리하였다[5,6].

그림 6은 충북선 토공구간의 표준장주도이며, 표 1은 충북선에 적용된 전차선로 선종과 특성을 나타내었다[3].

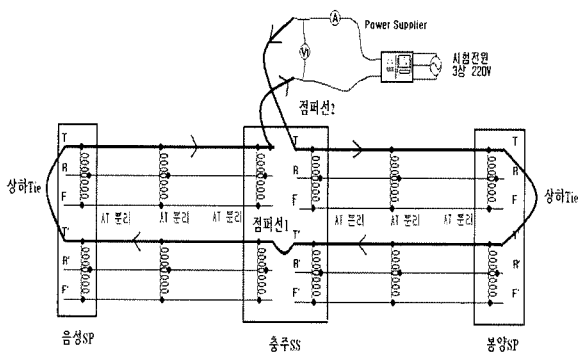


그림 3. 해빙 임피던스를 측정 회로

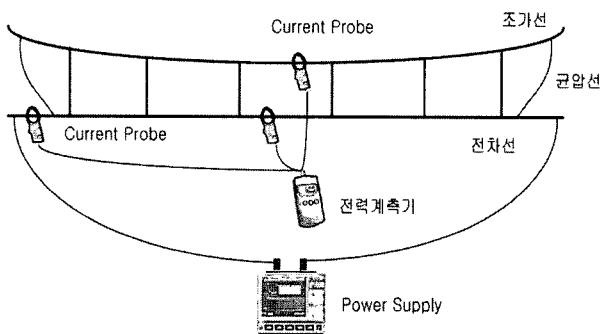


그림 4. 전차선, 조가선 전류비 측정 결선도

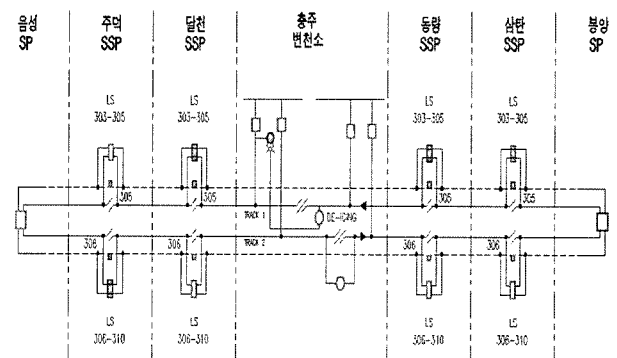


그림 5. 충주변전소 해빙시스템 기본 구성도

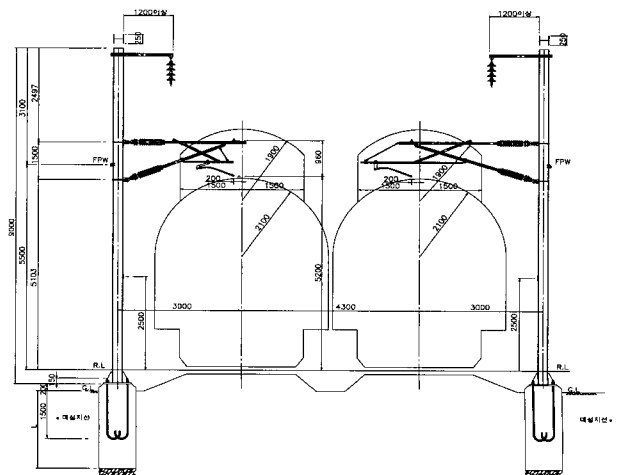


그림 6. 충북선 토공구간 표준장주도

표 1. 충북선 전차선로 선종

선 종	규 격	도체직경 [mm]	무 계 [kg/m]	장 력 [kgf]	전기저항 [Ω/km]
전차선	Cu 110mm ²	12.34	0.9877	1000	0.1592
조가선	CdCu 70mm ²	10.5	0.5974	1000	0.3315

4.2 칼슨-플라ček 식을 이용한 해빙임피던스 예측

충북선 충주변전소 해빙임피던스 예측을 위해서 칼슨-플라ček 식을 이용하였다[4,5].

i) 전차선 자기 임피던스(Z_T , Cu 110mm²)

- 내부 임피던스
 $Z_{Ti} = 0.1592 + j0.0188$ [Ω/km]
- 외부 임피던스
 $Z_{To} = 0.0583 + j0.8932$ [Ω/km]
- 자기 임피던스
 $Z_T = Z_{Ti} + Z_{To} = 0.2175 + j0.9120$ [Ω/km]

ii) 조가선 자기 임피던스(Z_M , CdCu 70mm²)

- 등가높이(h_M) = $h_{M0} - \frac{2}{3} \cdot \frac{WL^2}{8T} \times 100 = 6.6355$ [m]
(W : 무게, L : 장간길이(50m), T : 장력)
- 내부 임피던스
 $Z_{Mi} = 0.3315 + j0.0188$ [Ω/km]
- 외부 임피던스
 $Z_{Mo} = 0.0582 + j0.9055$ [Ω/km]
- 자기 임피던스
 $Z_M = Z_{Mi} + Z_{Mo} = 0.3897 + j0.9243$ [Ω/km]

iii) 전차선과 조가선의 상호 임피던스(Z_{TM})

- 조가선의 높이(h_M) = 6.6355 [m]
- 전차선의 높이(h_T) = 5.80 [m]
- 두선의 수평거리(b) = 0 [m]
- 상호 임피던스
 $Z_{TM} = 0.0583 + j0.5231$ [Ω/km]

iv) 전차선 대지귀로 자기 임피던스(Z_i)

$$Z_i = \frac{Z_T Z_M - Z_{TM}^2}{Z_T + Z_M - 2Z_{TM}} = 0.1758 + j0.7268$$
 [Ω/km]

- 등가높이(h_e)

$$h_e = h_T + \frac{h_M \cdot S}{h_T + h_M} = 6.1794$$
 [m]

$$(S = (h_M - h_T) - \frac{2}{3} \times \frac{WL^2}{8T} \times 100 = 0.7111$$
 [m])

v) 상·하행 전차선간의 상호 임피던스(Z_{tt})

- 전차선로 높이(h_e) = 6.1794 [m]
- 상행, 하행 전차선로의 수평거리(b) = 4.7 [m]
- 상호 임피던스
 $Z_{tt} = 0.0583 + j0.3929$ [Ω/km]

vi) 해빙 임피던스

- km당 해빙 임피던스(Z_d)
 $Z_d = Z_{t상행} + Z_{t하행} - 2 \times Z_{tt} = 2(Z_t - Z_{tt})$
 $= 0.2350 + j0.6678$ [Ω/km]
- 충주변전소 해빙 임피던스($Z_{deicing}$)
 $Z_{deicing} = Z_d \times D = 11.9035 + j33.8955$
 $= 35.9339 \angle 70.6^\circ$ [Ω] (D : 50.76 [km])

4.3 전차선과 조가선 전류비 예측

전차선과 조가선에 흐르는 전류비를 예측하기 위해서 단위길이에 대한 전압강하가 동일한 특성을 이용하였다.

i) 전차선 전압강하 = 조가선 전압강하

$$V_T = V = Z_T I_T + Z_{TM} I_M$$

$$V_M = V = Z_{TM} I_T + Z_M I_M$$

ii) 전차선과 조가선에 흐르는 전류 계산

$$\begin{bmatrix} I_T \\ I_M \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_T Z_M - Z_{TM}^2} \begin{bmatrix} Z_M & -Z_{TM} \\ -Z_{TM} & Z_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix}$$

iii) 전차선과 조가선 전류비

$$I_T : I_M = \frac{(Z_M - Z_{TM})}{(Z_T Z_M - Z_{TM}^2)} : \frac{(Z_T - Z_{TM})}{(Z_T Z_M - Z_{TM}^2)}$$

$$= 0.7495 : 0.6076 \approx 55 : 45$$
 [%]

4.4 해빙전류 예측

해빙전류는 전차선로가 단락된 회로에 흐르는 전류이므로 해빙 임피던스뿐만 아니라 해빙회로에 전력을 제공하는 한국전력의 전원계통부터 송전선로, 스코트변압기, AT변압기의 계통 데이터를 이용하여 예측해야 한다. 표 2는 해빙전류를 예측하기 위한 한국전력부터 해빙임피던스까지의 계

표 2. 계통 임피던스

계통	기호	기준값 [%Z]	임피던스 [Ω]	55kV환산 [Ω]
한전전원 (정상분)	Z_{kepc}	100MVA	0.186+ j2.120	0.0563+ j0.6413
송전선로 (정상분)	Z_{TL}	100MVA	0.0130+ j0.0609	0.0039+ j0.0184
스코트 변압기	Z_{scott}	15MVA	j10	j20.1667
AT (단권 변압기)	Z_{AT}	7.5MVA	j0.4	j0.4033
해빙회로	$Z_{deicing}$	27.5[kV]	11.9035+ j33.8955	46.088+ j115.72

통 데이터와 55kV기준으로 환산한 임피던스 크기를 나타낸 것이다. 표 2의 계통 임피던스를 이용하여 해빙전류와 급전 전압을 예측하면 아래와 같다.

i) 변압기 병렬운전시 해빙단락 임피던스(Z_0)

$$Z_0 = 2(Z_{kepc} + Z_{TL}) + Z_{scott} + Z_{AT} + Z_{deicing}$$

$$= 47.8428 + j157.47 = 164.5774 \angle 73.1^\circ [\Omega]$$

ii) 해빙전류($I_{deicing}$)

$$I_{deicing} = \frac{55000}{|Z_0|} = 334.1892 \angle 73.1^\circ [A]$$

iii) 급전반 전압

$$V_{feeder} = V_{kepc} - [2(Z_{kepc} + Z_{TL}) + Z_{scott}] \times I_{deicing}$$

$$= 48.394 \angle 2.7^\circ [kV]$$

충북선 충주변전소 해빙시스템의 해빙전류는 334A(55kV 기준)로 예측되었으며 급전용 변압기 1차측 전압은 48.394kV로 예측되었다. 해빙전류의 크기를 27.5kV로 환산하면 668A 정도이며 이 값은 최대 전류값인 1,000A이내이며 동시에 서리를 제거할 수 있는 정도의 전류이므로 충북선 충주변전소의 해빙구간은 적절하다고 판단할 수 있다.

4.5 해빙 임피던스 실측결과

충북선 충주변전소에서 해빙회로를 구성하고 그림 3과 같이 저압을 인가하여 해빙 임피던스를 측정하였다. 표 3은 공급전압을 50V, 100V, 150V로 순차적으로 인가하고 이때 흐르는 전류와 역률을 측정하여 해빙 임피던스의 크기를 계산한 것이다. 인가된 전압에 따라 계속된 해빙 임피던스 크기에 차이가 발생하였으나 이는 저압을 인가하여 계속한 계속오차라고 간주할 수 있다.

표 3. 해빙임피던스 및 Km 당 임피던스 측정결과

공급 전압 [V]	계측 전류 [A]	계측 역률	해빙 임피던스 [Ω]			km 당 임피던스 [Ω]		
			Z	R	X	Z	R	X
50	1.82	0.37	27.486	10.170	25.535	0.271	0.100	0.251
100	3.26	0.37	30.642	11.338	28.468	0.302	0.112	0.280
150	4.82	0.37	31.139	11.522	28.929	0.307	0.113	0.285

표 4. 해빙임피던스 예측값과 실측값 비교

방법	복소좌표	극좌표
예측값	11.9305 + j33.8955	35.934 \angle 70.6°
실측값	11.522 + j28.929	31.139 \angle 68.3°

표 5. 전차선/조가선 전류비 측정결과

공급 전압 [V]	계측전류 [A]			전류 분류비 [%]
	합계	전차선	조가선	
50	1.82	0.94	0.90	51.09% : 48.91%
100	3.26	1.72	1.56	52.44% : 47.56%
150	4.82	2.56	2.25	53.22% : 46.78%

표 6. 전차선/조가선 전류비 예측값과 실측값 비교

방법	전차선 [%]	조가선 [%]
예측값(칼슨-플라첵)	55.23	44.77
실측값(150 [V])	53.22	46.78

표 4는 칼슨-플라첵 식을 이용한 예측값과 150V 전압을 인가한 실측값을 비교한 것이다. 표 4에서와 같이 예측값과 실측값에는 약간의 차이가 발생하였다. 이는 칼슨-플라첵 식을 이용한 예측값은 토공 단독구간을 대표값으로 선정하여 예측한데 반해 실 계통은 토공 단독구간, 토공 빔구간, 터널 구간, 교량 구간 및 역사 등이 혼재되어 있어 임피던스 크기에 차이가 발생하였다고 볼 수 있다. 하지만 예측값과 실측값의 차이가 크지 않아 해빙시스템 구간을 선정하는데 있어서는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

전차선과 조가선의 전류 분류비를 측정하기 위해 해빙 임피던스 측정시에 그림 4와 같이 전차선과 조가선에 계측기를 연결하여 전류 분류비를 측정하였다. 표 5는 전차선과 조가선의 전류 측정결과이다. 전차선과 조가선의 전류 분류비 측정결과에서도 인가된 전압크기에 따라 계속값에 약간의 차이가 발생하였으나, 이는 저압 인가에 따른 계속오차로 간주할 수 있다.

표 6은 전차선과 조가선 전류 분류비 예측값과 150V를 인가한 경우에 전차선과 조가선의 전류 분류비 측정결과를 비교한 것이다. 전차선과 조가선에 흐르는 전류크기는 계속 오

차를 고려해 보면, 예측값과 실측값에 크게 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다.

4.6 송복선 송주변전소 해빙시스템 모의시험 및 분석

본 논문에서 제시한 기존선 해빙시스템 구성을 위한 절차에 의해 구성된 해빙시스템에 대한 실제적인 운영에 따른 전기적인 특성을 비교하기 위해서 그림 5와 같이 송복

표 7. 급전반 전압, 전류 예측값과 모의시험값 비교

	급전반 전압 [kV]	급전반 전류 [A]	급전반 역률
예측값	48.394	334.972	0.34
모의 시험값	47.915	323.970	0.33

표 8. 해빙임피던스 예측값과 모의시험값 비교

방법	복소좌표	극좌표
예측값	11.9305 + j33.8955	35.93 ∠ 70.6°
모의 시험값	13.6807 + j34.3508	36.97 ∠ 68.3°

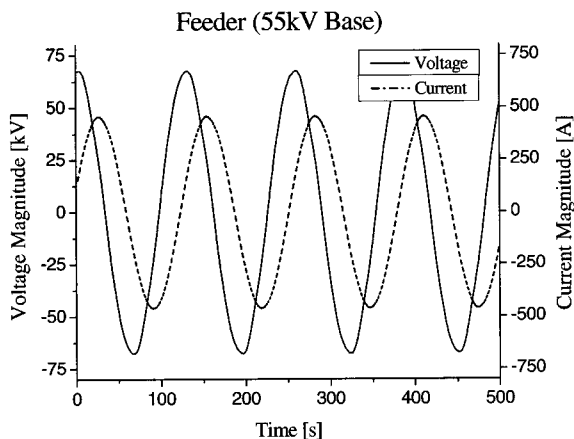


그림 7. 급전반(55kV Base) 전압, 전류

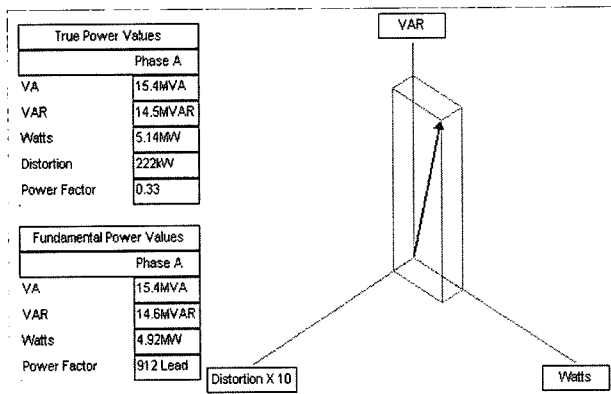


그림 8. 해빙시스템 역률

선 송주변전소 해빙시스템을 구성하여 실제로 해빙시스템을 운영하는 경우의 급전반 전압, 전류를 측정하였다. 그림 7은 해빙시스템 동작시 급전반(55kV base)에 계측된 전압, 전류이며, 그림 8은 계측기에서 측정된 역률을 나타낸 것이다.

해빙시스템 전압, 전류 그리고 해빙임피던스의 예측값과 모의시험값을 비교해 보면 표 7과 8과 같다. 표 7의 급전반 전압, 전류 그리고 역률을 비교한 결과와 표 8의 해빙 임피던스 크기를 비교 결과를 볼 때 본 논문에서 제시한 칼슨-폴라첵 식을 이용한 예측값과 실제 해빙시스템 운영시의 실제 시험값에는 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 차이는 기존선 해빙시스템 구성을 위한 해빙구간 선정 및 실제 해빙시스템 운영에 있어서 크게 영향을 미치지 않는다. 따라서 위의 해빙시스템 실제 시험결과를 볼 때 본 논문에서 제시한 해빙시스템 구성을 위한 해빙 임피던스 및 해빙전류 예측기법 및 해빙구간 선정을 위한 절차가 타당하다는 것을 판단할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 동절기 전차선에 발생하는 서리 또는 결빙을 제거하기 위한 해빙시스템의 해빙전류 예측기법 및 해빙구간 선정을 위한 절차를 제시하였다. 해빙전류 예측을 위해서 선정된 해빙구간의 해빙 임피던스는 칼슨-폴라첵 식을 이용하여 예측하였으며, 단위길이당 전압강하가 동일한 특성을 이용하여 전차선과 조가선의 전류 분류비를 예측하였다. 또한 해빙구간의 계통데이터를 이용하여 해빙전류와 전차선의 전류량을 예측하였다. 최종적인 해빙구간 선정을 위해서 저압을 인가하여 해빙임피던스와 전차선과 조가선의 전류 분류비를 계측하여 예측값을 검증하였다.

송복선 송주변전소를 대상으로 해빙시스템 구간을 선정하고 제시한 예측기법과 해빙구간 선정절차에 따라 해빙시스템 구간을 선정하였으며, 실제 해빙시스템 구간을 구성하여 모의시험한 결과 예측값과 모의시험값에는 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 이를 통해 제시한 예측기법과 해빙구간 선정절차의 타당성을 입증하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 해빙임피던스 예측 및 해빙시스템 구성 절차에 따라 안정적인 기존선 해빙시스템 구성이 가능하다고 판단된다.

향후 해빙시스템의 운영의 신뢰성을 높이기 위해 보호계전 방식과 정정에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 한국철도시설공단 (2002), “해빙시스템 교육자료”, 한국철도시설공단.
2. Ladislav, F. (1985), “Thermal interaction of long welded rails with railway bridges,” Rail International, Vol.16, No.3, March, pp.5-24.
3. 한국철도기술연구원 (1998), “전차선로 회로정수 측정 및 보호회로 최적화 방안 연구”, 철도청.
4. 한국철도기술연구원 (2000), “철도급전시스템 체계화 구축 연구”, 한국철도기술연구원.
5. 박영, 권삼영, 정호성 외 4인 (2005), “해빙시스템을 이용한 전차선 온도특성에 관한 연구”, 한국전기전자재료학회 하계학술대회.
6. 삼성C&M시스템 (2003), “충주변전소 보호계전기 정정보고서”, 철도청.