

관로 부설 송전 케이블의 허용전류 계산 프로그램 개발

정성환*, 김대경, 최상봉, 이동일, 강지원, 박방명, 탁의균, 윤형희, 김재승, 박준호, 김형수
한국전기연구원 한전 전력연구원, 한국전력공사, 부산대(PNU)

Development of the Permissible Current-Carrying Capability Calculation Program of Transmission Power Cables Installed in Ducts

S.H.Jeong*, D.K.Kim, S.B.Choi, D.I.Lee, J.W.Kang, B.M.Gwak, E.G.Tack, H.H.Yoon, J.S.Kim, J.H.Park, H.S.Kim
KERI KEPRI KEPCO PNU

Abstract - This paper introduces the program of calculating the permissible current-carrying capability of underground power cables. Its program is developed the KEPCO's standard based on IEC 287.

1. 서 론

경제성장과 함께 생활 수준의 향상으로 대도시의 전력 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 이와 같은 전력 수요의 증가에 대비하고 도심지 전력 계통의 공급 신뢰도의 향상과 도심지 미관을 고려한 환경 친화적인 송전 선로를 건설하기 위하여 지중 송전 선로의 건설은 필연적이다. 하지만, 도심에서는 지중 송변전 설비를 위한 공간 확보가 곤란하고 지중 송전선로를 건설하기 위한 기간과 건설비용이 과다할 뿐만 아니라 민원 발생의 원인이 되기 때문에 부하 증가에 맞춘 적기 건설이 불가능할 수도 있다. 따라서, 기설 지중 송전 선로의 송전 능력을 정확하게 파악하고 필요 불급한 지중 송전 선로의 건설을 억제하면서 전력공급 능력을 극대화할 필요가 있다.

지중 송전 케이블의 허용전류를 계산하는 규격은 1957년 J. H. Neher와 M. H. McGrath의 "The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability" 논문에서 제시한 해석적 방법을 근간으로 하여 구미와 유럽에서는 IEC Pub 287 (1994) "Calculation of the Continuous Current Rating of Cables(100% Load Factor)"로, 일본에서는 (사)일본전선공업회의 JCS 168E (1995) "電力케이블의 許容電流"로 각각 정착되어 왔다.

최근 한국전력공사는 지중 송전케이블의 허용전류를 계산하는 기준을 JCS 168D규격에서 IEC 287 규격으로 일부 개정하였다. 즉, 과거 JCS 168D규격에서 의미 없이 사용되거나 각 종 열적 파라메타 및 허용전류 계산식에서 적용되는 각 종 저감 계수 등을 IEC 287규격과 비교하여 적용상의 오류를 파악한 뒤 국내 실정에 맞는 허용전류 산정 기준을 정립한 바 있다.

본 논문은 이와 같은 한국전력공사의 지중 송전케이블의 허용전류를 산정하는 기준을 근간으로 하여 지중 송전 선로의 건설과 선로 운영을 위한 지중 송전케이블의 허용전류를 계산하는 프로그램을 GUI 기법을 이용하여 개발하였으며 그 내용을 소개한 것이다.

2. 본 론

2.1 프로그램 개발 환경 및 특징

현재 개인용 컴퓨터의 운영체제가 MS Windows 95이상이기 때문에 사용자 환경에 적합하고, 편리하면서 간편하게 데이터를 입출력할 수 있으며 정확한 해석 결과를 제공할 수 있도록 MS Visual C++을 개발 언어로 채택하여 아래와 같은 특징을 가진 프로그램을 개발하였다.

○ Graphical User Interface

케이블 데이터를 추가하거나 기존 케이블 데이터를 수정할 때 케이블 제원이 입력될 때마다 화면 우측에 케이블 형상을 그려줌으로 입력(수정)하는 케이블 데이터의 정오를 확인할 수 있게 하였다. 또, 전력케이블을 지중 또는 관로에 부설할 경우 관로의 배열 혹은 케이블의 배치 현황을 시각적으로 볼 수 있게 하였다.

○ Powerful Mouse-Driven Interface

데이터의 입출력, 포설 현황의 확인 및 계산 수행과 관련된 것을 마우스를 이용하여 볼 수 있거나 이동할 수 있게 하였다.

○ Point and Click Access to Data and Reports

케이블 데이터의 입력 및 변경 혹은 부설된 케이블의 종류, 회선정보를 해당 메뉴나 부설현황에서 마우스로 클릭하면 그 정보를 볼 수 있게 하였다. 또, 자주 사용하는 각 종 전기적 및 열적 파라메타를 고유 값(Default)으로 미리 설정해 놓았다.

○ Comprehensive Tabular Reports

케이블의 종류 및 케이블의 각 구성요소별 전기적 혹은 열적 파라메타에 대하여 DataBase를 구축하였으며, 사용자가 이해하기 쉽도록 계산에 사용된 값과 각 종 계산 결과 및 허용전류를 표로 작성하여 출력하였다.

○ User Friendly Interactive and Sequential Procedure

사용자가 마치 케이블을 설계하고, 설계한 케이블을 직접 지중 혹은 관로에 부설하는 일련의 과정을 순차적으로 진행하여 허용전류를 계산할 수 있게 하였으며, 각 과정마다 대화형으로 데이터를 수정 혹은 선택할 수 있게 하였다.

2.2 프로그래밍 규격

- (1) 중심 규격
 - (가) IEC 287-1-1
 - (나) IEC 287-1-2
 - (다) IEC 287-2-1
 - (라) IEC 287-2-2
 - (마) IEC 287-3-1
 - (바) IEC 287-3-2
 - (사) IEC 853
 - (아) IEC 949
- (2) 보조규격 : JCS 168E
- (3) 참고 규격 및 문헌
 - (가) IEC 228
 - (나) IEC 141
 - (다) Neher-McGrath법

2.3 허용전류의 계산 모드 및 포설 조건

(1) 허용전류 계산 모드

(가) 정상상태 허용전류

- 평형 부하 조건
 - 상시 허용전류
 - 단시간 허용전류
 - 고장 순시 허용전류
- 불평형 부하 조건
 - 상시 허용전류
 - 단시간 허용전류
 - 고장 순시 허용전류

(나) 과도상태 허용전류

- 비상시간과 비상허용온도가 주어질 때
비상시 허용전류 계산
- 비상부하전류와 비상허용온도가 주어질 때
비상운전 시간 계산
- 비상부하전류와 비상운전시간이 주어질 때
비상운전 허용온도 계산

(다) 통전전류에 대한 케이블 및 주변 온도의 해석

(2) 부설 조건

(가) 관로 부설

선, 관로 10,13,14번에 1회선 및 관로 12,15,16번에 1회선씩 총 3회선을 부설하였다.

No	구분	선명	선径	구경	재료사	부품명	공통부하	부하 (A)	부하 (MVA)	부하 (MW)	부하 (MVA)	부하 (MW)		
1	154.0	대안	XLPE	2000	대안	전력구	대안	3000	3	평상	932.2	90.0	220.5	89.7
2	154.0	대안	XLPE	2000	대안	전력구	대안	3000	3	평상	612.7	90.0	220.5	59.4
3	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	M/S #1	1200	3	평상	1130.1	90.0	220.5	124.4
4	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	M/S #1	1200	3	평상	1071.5	90.0	220.5	119.7
5	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	M/S #1	1200	6	평상	1016.6	90.0	220.5	113.3
6	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	대안	5000	5	평상	1392.0	90.0	220.5	153.5
7	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	구포/S/S	5000	4	평상	1405.9	90.0	220.5	161.7
8	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	구포/S/S	5000	4	평상	1398.9	90.0	220.5	161.2
9	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	구포/S/S	5000	4	평상	1405.9	90.0	220.5	161.7
10	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	구포/S/S	5000	4	평상	1405.9	90.0	220.5	161.7
11	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	구포/S/S	1350	4	평상	910.1	90.0	220.4	152.6
12	154.0	대안	XLPE	2000	대안-LG	전로	구포/S/S	1500	4	평상	1392.0	90.0	220.5	163.5

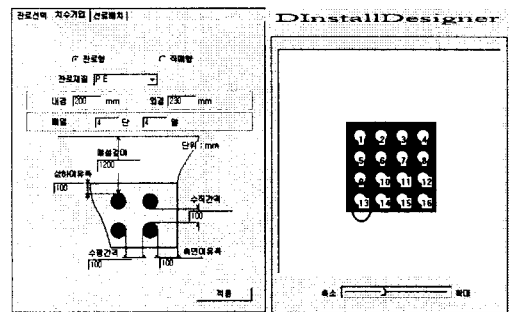
<그림 2.1> 주 프로그램(ampacity)의 메인화면

2.4 프로그램의 구성

지중 송전케이블의 허용전류를 계산하는 프로그램은 크게 주 프로그램 1개와 부 프로그램 3개로 구성되어 있다. 주 프로그램은 송전케이블의 허용전류를 계산하며, 부 프로그램은 허용전류를 계산하기 위한 기본적인 정보 즉, 케이블 정보, 부설 현황 및 부설된 선로 정보(접속방법, 배치, 선로명)를 입력한다. 주 프로그램에서는 항상 부 프로그램을 불러 올 수 있으며, 부 프로그램들은 부 프로그램만으로 각각 독립적으로 기능들을 수행할 수 있도록 설계하였다. 지중 송전케이블의 허용전류 산정 프로그램의 구성은 <표 2.1>과 같다.

<표 2.1> 프로그램의 구성

프로그램 종류		기능
구분	프로그램 명	
주 프로그램	Ampacity	- 송전용량 평가 주 프로그램 - 정상상태 허용전류 계산 - 과도상태 허용전류 계산 - 케이블 편집 - 부설현황 편집
부 프로그램	Cable-Designer	- 케이블 편집
	Dinstall-Designer	- 직매/관로 제원과 주변조건 입력 및 편집 - 전력케이블 부설 - 선로 정보 입력
	Tinstall-Designer	- 전력구(대기중)와 주변 조건 입력 및 편집 - 전력케이블 부설 - 선로 정보 입력



<그림 2.2> 관로 부설 조건

(3) 허용전류 계산 결과

<그림 2.2>와 같은 부설조건에 대하여 허용전류를 계산한 결과를 나타내면 <그림 2.3>과 같다.

허용전류 계산결과

1 허용전류 계산결과

1 개요
 1) 계산규격 : 한전 지중송전설계기준 1699 - IEC287 (1994)
 2) 선로명 : 154kV 검토 #2 T/L
 3) 선종 : XLPE 2000mm² 3C
 4) 검토구간 : 운영부 ~ 전기면
 5) 계산일 : 2001년 4월 4일

2 계산결과

회선수	상 시		고장순시 허용전류 (A)	단 시 간	
	허용전류 (A)	송전용량 (MVA)			
1	1033.27	449.99	220.46	2202.16	597.40
2	1033.27	342.21	220.46	1626.88	513.97
3	1130.12	301.44	220.46	1634.40	499.30
4	1033.98	262.22	220.46	1763.97	478.51
5	1033.98	275.53	220.46	1780.19	474.94
6	1016.62	271.17	220.46	1771.35	472.48

II 해석 조건

<그림 2.3> 관로 부설 송전케이블의 허용전류 계산 예

<그림 2.3>과 같은 허용전류 계산 예와 같이 본 예제의 경우에 대하여 계산 결과를 상세하게 나타내면 아래와 같다.

1. 허용전류 계산결과

1. 개요

- 1) 계산규격 : 한전 지중송전설계기준 1699 - IEC287 (1994)
- 2) 선로명 : 154kV 검토 #2 T/L
- 3) 선종 : XLPE 2000mm² 3C
- 4) 검토구간 : 운영부 ~ 전기면

2.5 관로에 부설된 송전케이블의 허용전류 계산

허용전류 산정 프로그램을 실행하면 <그림 2.1>과 같이 주 프로그램의 메인 화면이 표시된다. <그림 2.1>에서 보는 바와 같이 기능 버튼은 허용전류 계산과 관련된 "추가", "수정" 및 "계산" 버튼과 케이블 및 부설 조건만을 복사하여 다시 계산할 수 있도록 해 주는 "복사"버튼 및 그의 계산 결과를 출력해 주는 "출력"버튼과 "삭제" 및 "검색"버튼으로 구성되어 있다.

(1) 전압 및 케이블의 종류

: 154kV 2000mm² XLPE Cable 3회선

(2) 부설조건 : 관로(내경 200mm φ)

<그림 2.2>에서 보는 바와 같이 관로 5,6,9번에 1회

5) 계산일 : 2001년 4월 4일

2. 계산결과
1) 허용전류

회선수	상 시		단 시 간	
	허용전류[A]	송전용량[MVA]	허용전류[A]	송전용량[MVA]
1	1683.28	448.99	220.48	587.39
2	1391.18	371.08	220.48	533.00
3	1077.49	287.41	220.48	479.53

II. 해석 조건

1. 계산조건

- 1) 부하조건 : 정상상태/불평형부하
- 2) 케이블 : XLPE 2000mm² 3C
- 3) 온도조건
 - 주위온도 : 25 [°C]
 - 상시 최고허용온도 : 90 [°C]
 - 단시간 최고허용온도 : 105 [°C]
 - 고장순시 최고허용온도 : 250 [°C]
- 4) 도양 열저항률(K·m/W) : 0.9
- 5) Sheath 접지 : 크로스본드 접지
- 6) 부설방식 : 관로
 - 위치 : M/H #1-#2
 - 부설방법 및 규모 : 1공1조, 관내경 200 [mm], 4단 4열
 - 지표면에서 관로(케이블) 중심까지의 깊이 : 2305 [mm]

2. 케이블 제정수

- 1) 교류도체 실효저항(R) = 1.3273e-005 [Ω/m]
- ① R'(도체최고 허용온도에서의 직류저항) = 1.1476e-005 [Ω/m]

- R0(20°C에서의 직류도체저항) : 9e-006 [Ω/m]
- α20(도체저항 온도계수) : 0.00393 [1/K]
- θ(도체 온도) : 90 [°C]
- ② ys(표피효과계수) = 0.1498
- f(주파수) : 60 [Hz]
- Ks(분할도체계수) : 0.4350
- ③ yp(근접효과계수) = 0.0068
- dc(도체외경, 반도전층 불포함) : 55 [mm]
- s(도체 중심간격) : 392.4 [mm]
- Kp(분할도체계수) : 0.37

2) 유전체 손실(Wd) = 0.6606 [W/m]

- ① ω (=2πf) : 376.9911 [1/s]
- ② U0(정적전압) : 88911.9415 [V]
- ③ C(정전용량) : 2.2167e-010 [F/m]
 - ε(유전율) : 2.3
 - Di(절연외경, 반도전층 불포함) : 105 [mm]
 - dc(도체외경, 반도전층 포함) : 59 [mm]
- ④ tan δ (유전체 손실각) : 0.001

3) 금속 sheath 손실율(λ1) = 0.1536

- ① λ1'(회로 손실율) : 0.0500
- ② λ1''(외전류 손실율) : 0.1036

4) 절연체 열저항(T1) = 0.4195 [K·m/W]

- ρT(절연체 고유열저항) : 3.5 [K·m/W]
- dc(도체외경, 반도전층 불포함) : 55 [mm]
- t1(절연체 두께, 반도전층 포함) : 27.25 [mm]

5) 방식층 열저항(T3) = 0.0635 [K·m/W]

- ρT(방식층 고유열저항) : 3.5 [K·m/W]
- Ds(방식층의 내경) : 131 [mm]
- Doc(방식층의 외경) : 140 [mm]
- t3(방식층 두께) : 4.5 [mm]

3. 관로(M/H #1-#2)

1) 주변 열저항(T4)

- ① T4'(방식층 표면방산 열저항) = 0.0000 [K·m/W]
 - U / V / Y : 0 / 0 / 0
 - De(케이블 외경) : 140 [mm]
 - θm(케이블과 관로사이를 채우고 있는 매질의 평균온도) : 80.79 [°C]

② T4''(관 자체의 열저항) = 0.0779 [K·m/W]

- ρT(관의 열저항) : 3.5 [K·m/W]
- Dd(관의 내경) : 200 [mm]
- D0(관의 외경) : 230 [mm]

③ T4'''(도양 열저항) = 2.8920 [K·m/W]

- De(관로 외경) : 230 [mm]

4. 허용전류 및 송전용량

- 1회선 = 1683.28 [A] / 448.99 [MVA]
- 2회선 = 1391.18 [A] / 371.08 [MVA]
- 3회선 = 1077.49 [A] / 287.41 [MVA]

III. 고장 순시 허용전류

1. 단열상태의 고장순시 허용전류(IAD) = 219152.23 [A]

- A(도체공칭 단면적) : 2000 [mm²]
- t(고장순시 지속시간) : 1.7 [Sec]
- θi(고장순시 초기온도) : 89.9993 [°C]
- θf(고장순시 최종온도) : 250 [°C]

2. 회선별 계수

회선수	단열효과계수(ε)	X(접촉열저항계수)	Y(접촉열저항계수)
1	1.0061	0.4140	0.1188
2	1.0061	0.4140	0.1188
3	1.0061	0.4140	0.1188

3. 계산결과

회선수	고장순시 허용전류 (kA)		
1	220.48		
2	1.0061		
3	1.0061		

IV. 단시간 허용전류 : 판로(M/H #1-#2)

- 1) 운전시간 : 10 [H]
- 2) 상시 최대 허용전류

회선수	1	2	3
허용전류 [A]	1683.28	1391.18	1077.49

- 3) 단시간 운전직전의 통전전류 : 상시 최대허용전류와 동일
- 4) 단시간 운전직전의 통전전류(IE)시의 교류도체 실효저항 (RE)

= 1.3273e-005 [Ω/m]

5) 단시간 도체최고허용온도에서 교류도체저항(Rmax) = 1.3744e-005 [Ω/m]

① 단시간 허용온도에서의 직류도체 저항(R'max) = 1.2006e-005 [Ω/m]

- R0(20°C에서의 직류도체최대저항) : 9e-006 [Ω/m]

- α20(도체저항 온도계수) : 0.00393 [1/K]

- θ(도체 최고허용온도) : 105 [°C]

② ys(표피효과계수) = 0.1383

- f(주파수) : 60 [Hz]

- Ks(분할도체계수) : 0.4350

③ yp(근접효과계수) = 0.0064

- dc(도체외경, 반도전층 불포함) : 55 [mm]

- s(도체 중심간격) : 392.4 [mm]

- Kp(분할도체계수) : 0.37

6) 상시 최대허용전류(I) 통전직후의 도체 과도온도 상승분(θ R(t))

회선수	1	2	3	4
θ R(t) [K]	18.2556	11.5118	7.9682	

7) 상시 허용도체온도 상승분(θ R(∞))

회선수	1	2	3	4
θ R(∞) [K]	63.9976	63.3917	62.8568	

8) 단시간 허용도체온도 상승분(θ max)

회선수	1	2	3	4
θ max	78.9980	78.3933	77.8575	

① 단시간 최대허용온도 : 105 [°C]

② 주위온도 : 25 [°C]

③ 유전체 손실에 의한 온도 상승분

회선수	1	2	3	4
Δθd	1.0020	1.6067	2.1425	

9) I = θ max / θ R(∞)

회선수	1	2	3	4
θ max/θ R∞	1.2344	1.2367	1.2386	

10) 10시간 운전시 허용전류 및 송전용량

회선수	단시간 허용전류 [kA]	단시간 송전용량[MVA]
1	220.14	587.39
2	199.24	533.00
3	179.78	479.53

3. 결론

허용전류 계산 예에서 보는 바와 같이 허용전류 산정 프로그램은 많은 기능들이 있으나 특히 다음과 같은 기능이 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

- 동일 케이블 및 이중 케이블에 대한 평형 부하 혹은 불평형 부하 조건에서 허용전류 계산
- 케이블의 도체, 금속 시스, 케이블 표면(관로 내부)의 온도 계산

[참 고 문 헌]

- [1] 정성환 외, "지중전력케이블의 허용전류 산정 규격의 최근 동향", 1999년도 추계학술대회, 328-330, 1999
- [2] 정성환 외, "온도의존성 항목을 고려한 지중배전케이블의 허용전류 계산에 관한 연구", 1999년도 추계학술대회, 141-143, 1999
- [3] IEC 287-1-1 "Electric Cables - Calculation of the Current Rating, Part 1 : Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculations of Losses", 1995, 8
- [4] JCS 168E, "전력케이블의 허용전류", 일본전선공업회, 1995