

초전도 전력케이블의 열 등가 회로에 관한 연구

A Study on the Equivalent Thermal Circuit for HTS Power Cable

이수길^{1,*}, 이흥재²Su Kil Lee^{1,*}, Heung Jae Lee²

Abstract: To develop the thermal analysis method for the thermal behavior of HTS power cable system, cooled with sub-cooled liquid nitrogen, new thermo dynamic model for HTS cable system is introduced. The introduced thermal model is mainly modified from the thermal circuit following to IEC60287 for underground power cable systems such as XLPE or paper wrapped insulation cables. The thermal circuits for HTS cables are similar to the forced cooled underground cable system but the major thermal parameters and the configuration is apparently different to the normal cable systems so there has been no proposals in this field of analysing method. In this paper, 154kV HTS cable system has been introduced as an aspects of thermal models and a thermal circuit is proposed for the fundamentals on the dynamic rating systems for the HTS cable system. By using the thermal circuit developed in this paper, the optimal controls on the sub-cooling system's capacity become possible and it is expected to make the efficiency of HTS cable higher than conventional static controls.

Key Words: HTS (High temperature superconductor), power cable, sub-cooled liquid nitrogen, cryogenic system.

1. 서 론

국내 전력 계통은 산업의 발달 및 국민 생활의 질적 향상에 따른 부하 증가에 대처하기 위한 전원 확충의 필요성이 증가하고 있다. 하지만, 가공 송전 시스템은 환경적인 문제 및 민원문제의 야기로 인한 경과지 확보의 어려움과 더불어 도시화가 증가하고 있는 추세에 따라서 선로 건설에 상당한 어려움이 따르고 있다. 따라서, 건설비가 많이 소요되는 단점을 가지고 있음에도 불구하고 상기의 문제점을 해결하기 위하여 송전선의 지중화율이 증가하고 있다. 이에 따라 증가하는 지중화율에 반하여 지중 케이블을 매설하기 위한 지중 경과지를 확보하기 어려운 상황에 직면하고 있다. 또

한, 국내에 매설된 지중 케이블의 수명은 평균 30년으로 산정하고 있고 2010년대에는 시공 후 30년 수명에 도달한 기 매설 케이블이 점차 증가하여 국내 지중 케이블의 교체시기가 본격적으로 도래할 것으로 예상된다. 이와 같은 지중 케이블의 밀도증가와 기 포설된 지중 케이블의 교체시기 도래에 따라서 기설 케이블의 포설공간이나 토목 구조물을 활용하여 지중 케이블 교체시에 송전용량이 획기적으로 증대된 지중케이블을 포설할 수 있는 대안을 연구하기에 이르렀고, 대표적인 지중 케이블이 고온 초전도 케이블로 여겨진다. 고온 초전도 케이블은 77K의 온도에서 저항이 사라지는 특성을 이용하는 지중 전력케이블로서, 동일한 크기의 케이블에 기존 구리 도체 케이블에 비해서 약 5배 ~ 15배의 전력을 송전할 수 있는 대용량 케이블이지만 77K이하의 온도를 케이블 전 구간에서 거쳐 유지해야 한다. 이에 따라서 케이블을 냉각하는 기술이 필요하다. 실제로 고온 초전도체는 80K ~ 100K 대까지 초전도 성질을 유지할 수 있으나, 냉매로 사용하는 액체질소의 대기압에서의 증발 온도가 77K이기 때문에 절연 유지 특성을 함께 고려하여 통상 77K을 고온 초전도체의 임계온도로 여기고 있다. 액체질소는 무극성, 절연특성, 증발온도의 경제성에 따라 초전도 케이블의 냉매로서 널리 채택되어 왔다. 순환하는 액체질소의 냉각능력 범위는 액체질소의 어는 온도에서 초전도 선재의 임계 온도까지이며, 이 범위에서 냉각시스템의 안정성과 경제성을 고려하여 운전 온도를 결정해야 한다[1].

초전도 전력 케이블의 열부하(thermal load)는 주위로부터 대류, 복사, 전도에 의한 침입 열부하와 통전시 케이블 내부에서 발생하는 통전손실에 의해 결정되는데, 이렇게 침입되고 발생된 열부하는 액체질소의 순환과 극저온 냉각시스템에 의해서 운전 온도가 유지된다[2].

케이블의 교류 통전 전류에 의한 도체 발열과 케이블을 구성하는 각 층의 열적 특성을 단위 전기소자로 등가회로로 단순화하여 풀기 위한 연구가 진행되어 왔다. 구리나 알루미늄을 케이블 도체로 사용하는 케이블에 대해서는 열 등가회로가 IEC60287 등에 따라서 표준화 되고 널리 사용되어 왔지만, 진공단열층을 가지고 액체질소를 냉매로 사용하는 고온 초전도 전력케이블에 대한 열 등가회로는 현재까지 개발되지 않아 정적상태와 동적상태의 초전도 케이블의 온도 산정이 불가능하였다.

본 연구에서는 IEC60287에 따르는 상도체 케이블의 등가 열모델을 바탕으로, 초전도 케이블의 특성을 반영한 새로운 열 등가 모델을 제안하고자 한다.

2. 본 론

¹정 회 원 : LS전선(주) 기술개발부문 수석연구원

²비 회 원 : 광운대학교 전기공학과 교수

*교신저자 : sglee@lscable.com

원고접수 : 2010년 02월 18일

심사완료 : 2010년 03월 05일

게재확정 : 2010년 03월 05일

2.1. 상도체 케이블의 열 등가회로

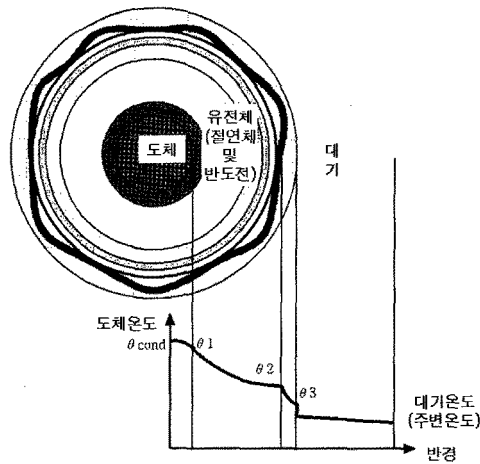
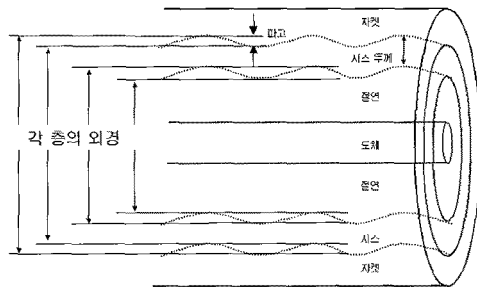


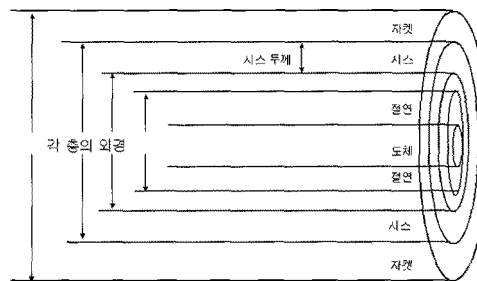
Fig. 1. 상도체 케이블의 단면 형상 및 온도 분포.

지중 송전 케이블은 구조, 재질, 포설 환경에 따라서 등가 전기회로로 근사화가 가능하다. 열 등가회로에서 실질적인 상수값들은 지중 송전 케이블의 재질과 형상에 의해서 결정된다. Fig.1에 국내에서 한국 전력의 표준으로 사용되고 있는 송전급 XLPE 케이블의 형상과 반경방향의 온도분포를 나타내었다.

지중 송전 케이블(전력구 포설 상태 가정)에서 나타나는 온도 구배는 Fig. 1과 같이 도체 내부(θ_1), 금속 시스 및 반도체 층을 포함한 절연층($\theta_1 \sim \theta_2$), 그리고 시스 보호용 자켓층 내($\theta_2 \sim \theta_3$)에서 지수적으로 감소하다가 시스(Sheath) 보호용 자켓층과 대기 사이에서 불연속적으로 감소된다. 국내 전력구에 포설되는 지중 송전 케이블은 Fig. 2(a)와 같은 파고를 가지는 시스 형상이지만 Fig. 2(b)와 같은 등가 형상으로 근사하였다.



(a) 기하학적 형상



(b) 등가 형상

Fig. 2. 지중 전력케이블의 등가 형상.

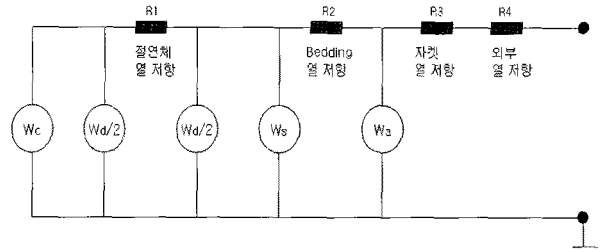


Fig. 3. 정상 상태에서의 등가 열회로.

여기서, $R_1 \sim R_4$: 케이블 각층의 열저항 [K·m/W]
 W_c : 도체발열량 [W/m]
 W_d : 유전체 손실 [W/m]
 W_s : 시스 손실 [W/m]
 W_a : 아머 손실 [W/m]

도체발열량은 주로 주울열과 와전류손실로 구성된다. 유전체 손실은 유전체에 교류전압이 인가될 때 쌍극자의 회전등에 의해서 발생하는 유전체 내의 분자마찰에 의한 열로서 고유 물성치와 인가되는 전계의 식으로 계산할 수 있다. 시스손실은 도체에 흐르는 전류에 의해서 시스층에 유기되는 전압과 접지회로를 고려하여 쉬스에 흐르는 전류의 주울열을 계산하여 구할 수 있다. 아머손실은 케이블이 금속 보호층을 구비한 경우에 비투자율에 따른 히스테리시스 손, 철손 등을 고려하여 계산할 수 있다.

각 손실치는 해석 대상 케이블의 기하학적 형태를 감안한 단위길이에서 발생하는 전체 발열량을 나타낸다. 정상 상태에서는 100%의 부하율을 가정하여 열용량에 의한 온도 응답 특성을 고려하지 않고, Fig 3과 같이 열 저항만으로 이루어진 열 모델을 사용한다. 과도 상태에서는 지중 송전 케이블 및 주변 매질의 열저항과 더불어 전기적 등가 회로의 정전 용량에 해당하는 열 용량을 고려하여 열 모델을 나타낸다. Fig.4는 열용량을 고려한 과도상태 등가회로로서 전력 케이블의 유전손실, 쉬스손실, 아머손실은 매우 적어 무시하였다.

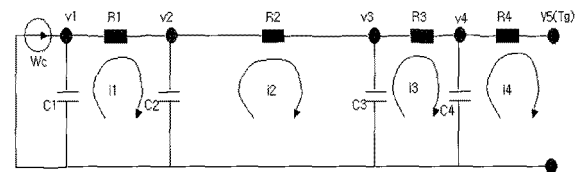


Fig. 4. 과도 상태 등가 회로.

여기서, C_1 : 도체 열용량 [J/K·m]
 C_2 : 도체외각에서 절연체 중간층까지의 열용량 [J/K·m]
 C_3 : 절연체 중간층에서 쉬스까지의 열용량 [J/K·m]
 C_4 : 쉬스층 열용량 [J/K·m]
 R_1 : 도체외각에서 절연체 중간층까지의 열 저항 [K·m/W]
 R_2 : 절연체 중간층에서 절연체 외각층까지의 열 저항 [K·m/W]
 R_3 : 자켓 열 저항 [K·m/W]
 R_4 : 대기층 열 저항 [K·m/W]
 $V_1 \sim V_4$: 케이블 각층의 온도 [K]
 $V_5(Tg)$: 외기온도 [K]

2.2. 초전도 케이블의 열 등가회로

2.2.1. 형상 및 주요 열 특성

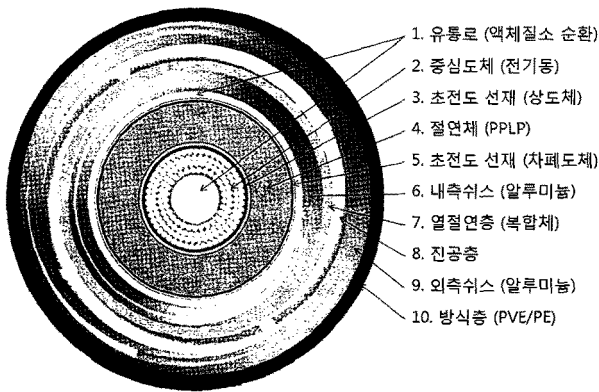


Fig. 5. 154kV 초전도 전력 케이블의 단면 형상.

Fig. 5에 154kV 초전도 케이블의 구조를 나타내었다.

Fig. 5에 대한 각 층의 77K에서의 재질별 특성은 Table 1에 따른다.

Table 1. 154kV/1GVA 초전도케이블의 열특성 예시.

| 구분 | 재질 | 열저항을 [K·m/W] | 비열 [J/K·m³] |
|------|------|----------------------|---------------------|
| 중심도체 | 전기동 | 2.5x10 ⁻³ | 2.8x10 ⁶ |
| 절연체 | PPLP | 67 | 3.0x10 ⁶ |
| 냉매 | 액체질소 | - | 1.7x10 ⁶ |

여기서, 외측 유통로 외부의 재질에 대한 열특성은 등가모델에서 제외하여 표기하지 않았다.

열저항과 비열은 각각 케이블의 형상에 따른 체적을 고려하여 등가 소자의 특성으로 계산될 수 있다. Table 2에 각각의 형상을 고려한 등가 열정수를 나타내었다. 원통형 케이블 각층별 온도 분포를 계산하기 위하여 푸리에 법칙을 고려한 온도분포 계산법에 의해서 단위 길이당 등가 소자로 열저항을 환산하였고, 열용량은 단위 길이당의 케이블 각층의 체적으로 고려하여 계산하였다.

Table 2. 154kV 1GVA 초전도 케이블 열상수.

| 구분 | 등가열저항 [K/W·m] | 등가열용량 [J/K·m] |
|------------------|----------------------|---------------------|
| 중심도체 (Former) | 3.0x10 ⁻⁴ | 1.0x10 ³ |
| 절연체 (PPLP) | 6.5 | 2.4x10 ³ |

2.2.2. 냉각 조건

초전도 케이블의 절연 두께를 감안하여 손실열을 액체질소의 흐름으로 효율적으로 제거하기 위하여 통전층과 차폐층의 유로는 Fig. 6과 같이 분리된다. 초전도 케이블의 냉각 유로는 열손실을 최소화 하기위해

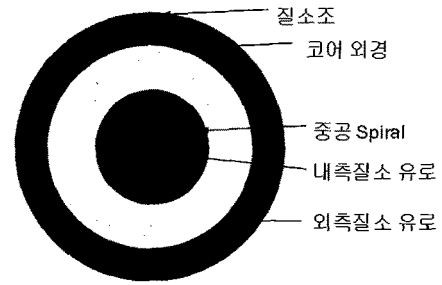


Fig. 6. Cross section of 154 kV HTS cable core.

케이블 코어 내/외측의 온도차를 제거하고, 장선 초전도 케이블의 최고 액체질소 순환압력을 넘지 않는 범위에서 압력손실을 제어할 수 있도록 형상을 결정해야 한다. 이와 같은 제약조건 하에서 최적의 코어 형상을 결정하기 위해 코어의 손실특성, 허용 온도차, 허용 압력손실 등을 고려하여 내측 유로 직경, 코어 외경, 케이블 cryostat 내경 등을 결정된다.

케이블 손실 및 유량관계는 아래의 에너지 균형 (energy balance)식을 통해 계산하였다. 즉 내/외측 필요 유량 \dot{m}_i 및 \dot{m}_o 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[3][4][5][6].

$$\dot{m}_i = \frac{Q_i}{c_p(\Delta T_i)} \tag{1}$$

$$\dot{m}_o = \frac{Q_o}{c_p(\Delta T_o)} \tag{2}$$

여기서 Q_i : 내측 유로의 케이블 열부하 [W]
 ΔT_i : 내측 유로 입출구 온도차 [K]
 Q_o : 외측 유로의 케이블 열부하 [W]
 ΔT_o : 내측 유로 입출구 온도차 [K]
 c_p : 액체질소 비열 [J/g·K]

Fig. 6의 케이블 구조상 내측과 외측 유로의 입구 온도는 같고 케이블 열손실이 최소가 되기 위해서는 내측과 외측 유로의 출구 온도도 같아야 한다. 또한 압력 균형 (pressure balance)도 케이블 구조의 특성상 아래와 같은 식을 만족해야 한다[7].

$$\Delta P_i = \Delta P_o$$

여기서 ΔP_i : 내측 유로 입출구 압력차 (kPa)
 ΔP_o : 외측 유로 입출구 압력차 (kPa)

본 논문에서는 내/외측 액체질소의 온도 차이의 허용 범위를 1K로 가정하여 100m 케이블에 대해서 입출구 4K의 온도 차이를 고려하여 최대 부하전류 인가시 액체질소 유량은 내/외측 각각 0.1, 0.175 kg/s이고 부하전류가 최대치에 이르지 않은 경우도 유량은 변하지 않는 조건을 가정한다.

이 경우, 케이블에서 발생된 열을 냉각시키는 열량은 $Q = \dot{m}c_p\Delta T$ 로 구할 수 있으며, 각각의 냉각열량은 $Q_i = 0.5 \text{ W/m}$, $Q_o = 0.875 \text{ W/m}$ 로 각각 가정하였다.

2.2.3. 열 등가 회로 모델링

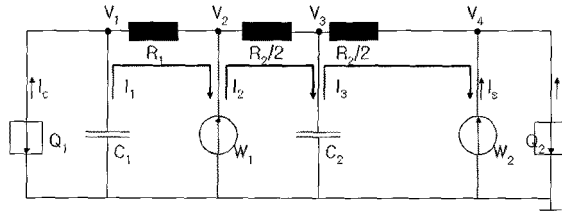


Fig. 7. 초전도 케이블의 열등가회로 모델링.

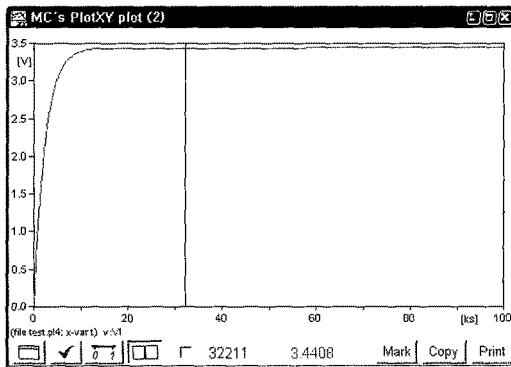
Table 3. 등가회로의 열 상수.

| | 정의 | 물리량 | 물리단위 |
|----------------|-----------------|----------------------|-------|
| Q ₁ | 내측유로 냉각열량 | 2.0 | W/m |
| C ₁ | 포머 열용량 | 1.0x10 ³ | J/Km |
| R ₁ | 포머의 열저항 | 3.0x10 ⁻⁴ | K·m/W |
| W ₁ | 초전도 도체층 AC Loss | 3.5@3,750A | W/m |
| R ₂ | PPLP 절연층 열저항 | 6.5 | K·m/W |
| C ₂ | PPLP 열용량 | 2.4x10 ³ | J/Km |
| W ₂ | 초전도 차폐층 AC Loss | 2.0@3,750A | W/m |
| Q ₂ | 외측유로 냉각열량 | 2.0 | W/m |

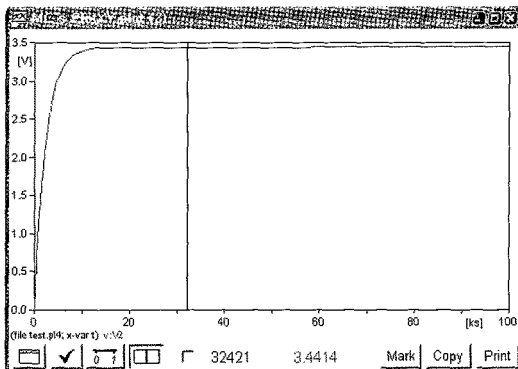
여기서, v₁~v₄ = 각 노드에서의 온도 [K], W₁, W₂는 부하조건에 따라 가변적임

3. 등가 열모델에 의한 과도 현상 분석

초전도 케이블을 정격 운전할 경우 가정한 평균온도를 초기온도로 가정하여 초기온도로 셋팅한 후, 정격 전류를 인가하고 냉각시스템을 정격 운전할 경우에



(a) 포머의 온도변화 분석결과



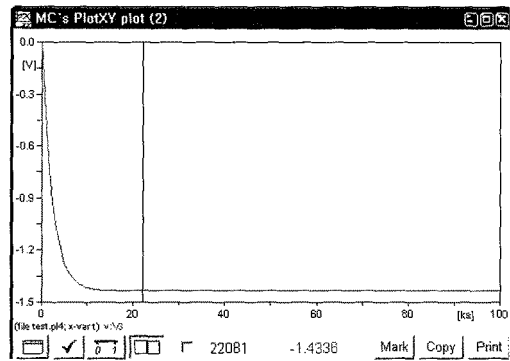
(b) 초전도 도체층의 온도변화

Fig. 8. 포머 및 초전도 도체 온도변화 그래프.

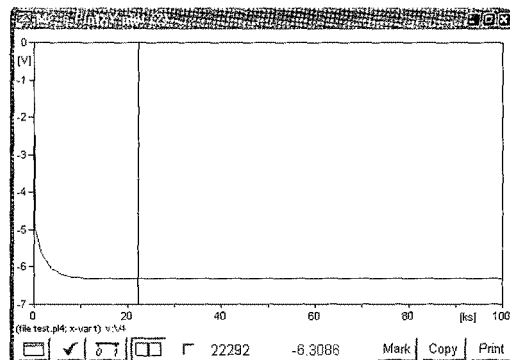
포머와 초전도 도체의 온도변화를 분석하였다. 정상상태 도달시간은 3τ를 기준으로 정상상태 값의 98.5%에 도달하는 시간을 기준으로 하였다.

Fig. 8에서는 포머의 온도는 포머 재질인 동의 비열에 의해서 8.95시간 후에 정상상태에 도달하고 도체층 초전도 선재의 온도 약 9시간 이후에 정상상태에 도달하며 각각의 정상상태 도달온도는 초기 온도 72K에 비하여 각각 3.44K이 상승하여 75.44K에 도달하는 것으로 나타났다. 이는 도체의 초전도 선재에 흐르는 전류에 의한 발열과 이를 냉각하는 내측 유로의 액체 질소 흐름의 균형치에 도달하는 점으로 판단된다.

절연체 중간부분의 온도와 차폐층 초전도 도체의 온도는 Fig. 9와 같이 각각 6.13시간과 6.1시간에 정상상태에 도달하였으며 각각의 온도는 평균값에 비하여 1.43K과 6.31K이 낮아지는 것으로 분석되었다.



(a) 절연체 층 중심 온도 분석 결과



(b) 초전도 차폐층 온도 분석 결과

Fig. 9. 절연체 중간부분과 차폐 초전도 도체의 온도변화 그래프.

4. 결 론

초전도 케이블의 특수한 열적 거동 조건을 상도체 케이블의 열적 과도상태 해석 알고리즘에 반영하여 154kV IGVA 초전도 케이블에 알맞은 열회로를 제안하였다. 열 응답특성을 계산한 결과, 약 9시간 이상의 정상상태 도달 시간이 필요한 것으로 나타났으며 이때 초전도 케이블 각 층에서의 온도 변화를 얻을 수 있었다. 본 결과를 바탕으로 초전도 케이블 구조에 따른 기하학적 관계를 가지는 열 특성을 전기회로 및 소자로 등가하여 수월하게 분석하는 것이 가능해 질 것으로 사료된다. 이에 따라 여러 가지 개연성 있는 케이블 운전상태 즉, 초기 냉각시의 온도 분포 및 전류 통

정량의 변화 및 냉각시스템의 운전 성능 변화 등 과도시의 케이블 내부의 주요지점에서의 실시간 온도 추정 등이 간단한 틀의 제작이나 활용 가능한 전기회로 분석 틀을 사용하여 가능해질 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

- [1] Korea Electrotechnology Research Institute, Development of Distribution Level HTS Power Cable, p. 250, 2004.
- [2] J.W.Cho, et al., Design and Experimental results of a 3 Phase 30m HTS Power Cable, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 16, no. 2, pp. 1602-1605, 2006.
- [3] Handbook of applied superconductivity, Institute of physics publishing, 1998.
- [4] Cryogenic Association of Japan, Handbook of Superconductivity and cryogenics, p. 318, 1994.
- [5] Hawthorne, R. C. and Von Helms, H. C., Prod. Engineering 34, p. 475, 1963.
- [6] Weisend, J. G. and Van Sciver, S. W., Cryogenics 30, p. 935, 1990.
- [7] Fuchino, S., Tamada, N., Ishii, I. and Higuchi, N., Hydraulic characteristics in superconducting power transmission cables, Physica 345, pp. 125-128, 2001.

저 자 소 개



이수길(李秀吉)

1970년 2월 2일생, 1992년 광운대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 박사과정 수료, 현재 LS전선 수석연구원.



이흥재(李興載)

1958년 1월 28일생, 1982년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1990년 동 대학원 박사, 현재 광운대학교 전기공학과 교수.