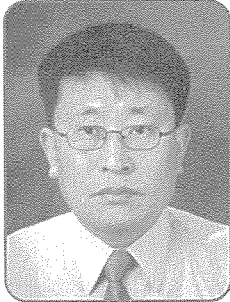


고온부에서 사용되는 가스터빈 소재의 파괴적 평가에 대한 연구



한전기공(주)
G/T 정비센터 기술팀
공학박사 김문영
Tel : 032-580-8255

1. 서론

가스터빈, 화력 및 원자력발전에서 사용되는 터빈부품 또는 원자력의 1차 계통의 부품(reactor vessel, steam generator) 등의 대부분은 일반적으로 고온에서 사용되어지고, 이러한 부품은 결함이 발생하였을 때 설비의 안전성을 고려하여 대부분 연성이 강한 고인성 재료를 사용하고 있다. 그러므로, 이런 고온부재는 소성경향이 강하게 나타나고, 고온에서는 항복강도가 상온에서 보다 현저히 저하되며, 장시간 사용에 의한 열화 및 손상을 받게 된다.

최근, 발전 설비용 고온부재를 대상으로 한 손상평가 및 수명예측기술 개발에 대한 관심이 고조되고 있고, 고온부재의 안전사용 및 경제적 운영의 필요에 따라 장기간 사용된 고온부재의 손상평거나 잔여 수명평가가 중요한 문제로 대두되고 있다. 고온부재가 받는 손상은 주로 크립과 피로손상으로 대별할 수 있고, 이들 손상의 해석은 고온부재의 탄소성거동을 명확히 적용하는 것이 중요하다. 고온부재의 손상은 기계적 성질의 저하와 함께 균열선단에서의 소성역이 커지므로 균열에 의한 손상을 탄소성 파괴역학적으로 표시할 수 있는 인자의 적용이 필요하다. 고온부재의 탄소성 파괴역학 인자로서는 선형탄성 파괴역학에서 사용되는 응력세기계수 K 의 적용은 이미 그 의미를 상실하고, 이러한 경우에는 탄소성 파괴역학 개념에서 사용되는 J적분의 적용에 의한 평가가 요망된다.

발전설비용 고온부재에 대한 고신뢰성의 손상평가, 수명예측 및 잔여수명을 평가하기 위해서는 무엇보다도 탄소성 파괴역학에 근거한 J적분의 정밀도 높은 수치해석과 이들 해석결과의 실험 검증이 우선 되어야 한다.

따라서, 본 논문에서는 소성변형 거동이 큰 연성재료로 발전설비용 고온부재에 사용되는 가스터빈 부품(retaining ring : GE Code B50A224B)에서 재료를 채취하여 CT(compact tension) 시험편을 제작하여 유한요소법(finite element method : FEM)에 의한 탄소성 J적분에 의한 수치해석 결과의 정밀도를 검증하고, 실험해석을 통하여 이들 결과의 유효성을 검토하였다.

2. 탄·소성 J 적분

2.1 J-적분의 식

탄소성 변형재료에 대한 파괴역학인자는 Rice가 제안한 J적분이 널리 이용된다⁽¹⁾. 비선형 또는 변형 소성이론에 의해 특성 지워지는 재료의 2차원 문제에 대한 경로적분 J는 다음 식과 같이 정의된다⁽³⁻⁴⁾.

$$J = \int_{\Gamma} (Wdy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (1)$$

여기서 W 는 변형률 에너지 밀도(strain energy density)로서 다음 식과 같이 된다.

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (2)$$

Fig. 1에서와 같이 T 는 적분경로 Γ 에 대한 표면력 벡터, $(T = \sigma_{ij}n_j)$ 는 u 변위 벡터, Γ 는 균열의 아랫면으로부터 윗면에 이르는 임의의 적분경로, n 은 외향 법선 단위벡터이고, ds 는 Γ 의 미소길이이다.

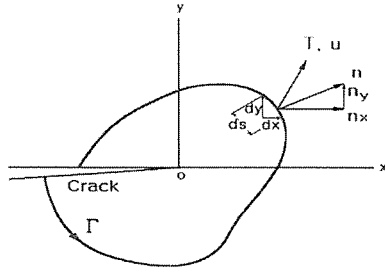


Fig. 1 Crack-tip coordinate system and typical line integral contour

또한 균열면이 x축에 평행이고, 균열면에서 표면력 $T=0$ 경우에 이 적분은 균열면의 J 도 포함한 폐곡선 Γ 의 선택방법에 관계없이 일정한 값으로 되는 경로 독립(path-independent)으로 된다.

2.2 선형탄성 파괴역학인자

응력세기계수 K와 J의 관계. 선형탄성체의 경우 모드 I 균열의 J 적분과 응력세기계수 K 과의 관계는 다음 식과 같이 된다.

$$J_I = \frac{K_I^2 (1-\nu^2)}{E} \quad (\text{평면 변형률}) \quad (3)$$

여기서 E 는 세로탄성계수, ν 는 푸와송의 비이고, E 와 전단탄성계수 μ 사이에는 다음 관계식이 성립한다.

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

따라서 균열선단 근방의 응력, 변형률, 변위 등을 유한요소법으로 구한 수치해석 결과를 이용하여 적분 경로 Γ 에 따라 식(1)을 수치적분을 하면, J 적분 값이 구해진다. 이렇게 얻어진 J 적분의 값을 식(3)에 대입하면 응력세기계수 K 이 구해진다.

응력세기계수 K와 에너지 방출률 G의 관계. 컴플라이언스 C 는 스프링 상수의 역수로 다음식과 같이 된다.

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (5)$$

여기서 P 는 작용하중이고, δ 는 하중점의 변위이다. 또한 시험편의 두께 B , 균열길이 a 인 모드 I에 대해서 에너지 방출률 G 는 균열길이에 대한 컴플라이언스의 변화로부터 다음식과 같이 구해진다.

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (6)$$

선형탄성체의 경우 파괴역학 인자 K , J 및 G 는 식(3)과 같이 등가를 가진다.

2.3 탄·소성 파괴역학인자

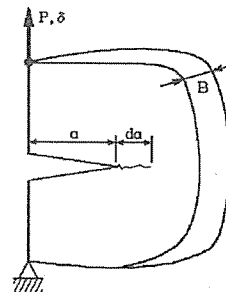
단위 균열진전에 대한 에너지의 변화를 특성지우는 형 파괴역학인자로 제안된 J 적분은 탄·소성 파괴 거동의 해석에 매우 유용한 인자이다. Fig. 2와 같이 균열길이가 a 이고, 두께가 B 인 시험편에 하중을 가하면 하중-하중선 변위 선도가 그려진 후 균열이 만큼 진전하면 하중은 감소한다. 이때 그림에서 빗금친 부분의 면적이 포텐셜 에너지(potential energy)의 증분 dU 를 의미한다.

따라서 균열이 진전하기 위한 단위 면적에 대한 포텐셜 에너지 소비율을 나타내는 J 는 다음과 같다.

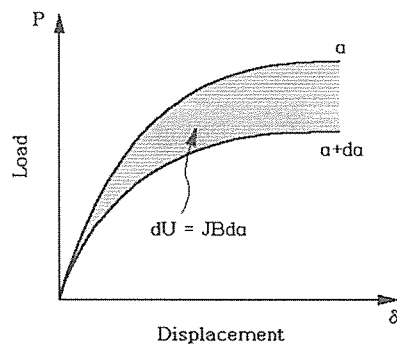
$$J = -\frac{dU}{dA} = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} = \int_r (W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (7)$$

여기서 U 는 포텐셜 에너지로서 다음 식으로 표시된다.

$$U = U_e + U_p \quad (8)$$



(a) Loading system



(b) Load-displacement diagram

Fig. 2 Interpretation of J-integral

U_e 는 포텐셜 에너지의 탄성성분이고, U_p 는 소성성분이다. 서로 다른 da 에 대한 각 실험으로부터 J 는 다음 식으로 구해진다.

$$J = \frac{A}{B \cdot b} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (9)$$

여기서, W 는 시험편의 폭이고, b 는 리거먼트 (ligament) 길이로써 $b = W - a$ 이다. 또한 A 는 하중-변위 선도에서 균열이 발생하기까지 시험편에 축적된 에너지로 선도에서 그려진 면적을 의미한다.

$$A = \int_0^{\delta_i} P_i d\delta_i = A_e + A_p \quad (10)$$

식(10)에서 P_i , δ_i 는 하중-변위 선도에서 각각 균열이 발생하기 시작하는 하중과 변위를 나타내고, A_e 는 탄성변형에 의한 면적이고, A_p 는 소성변형에 의한 면적이다.

식(9)에서 CT 시험편에 대하여 $f(a/W) \approx 2.2$ 이다. 따라서, 본 연구에서와 같이 CT 시험편을 사용한 경우 J 의 값은 평면변형을 상태에서 다음 식으로 표시된다.

$$J = J_e + J_p = \frac{K_1^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{2.2A_p}{B(W-a)} \quad (11)$$

또한, 탄·소성거동을 하는 모드 I 균열재의 파괴 기준은 다음 식과 같이 된다.

$$J_I \geq J_{IC} \quad (12)$$

윗 식에서와 같이 작용하중에 의한 탄·소성 J 값이 탄·소성재의 임계값 J_{IC} 보다 크거나 같게 되었을 때 탄·소성재에 대한 균열이 진전하게 된다.

3. 탄·소성 J 적분의 유한요소 해석

3.1 해석모델 및 요소분할

본 해석에서는 발전설비의 고온부재에 사용된 탄·소성 재질을 선택하였다. 사용재에 대하여 ASTM E8에 따라 인장 시험편을 제작, 실험하여 재료 물성치를 구하였다⁽²⁾, 물성치 측정 시험편의 폭은 25mm, 표점 거리는 30mm로 하였다. 물성치의 실험 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties

Young's modulus, E [Pa]	184.6
Poisson's ratio, ν	0.32
Yield stress, [MPa]	213.6
Tensile strength, [MPa]	270
Elongation [%]	34.8
Reduction of area [%]	37.5
Hardening parameter, H [MPa]	1034

본 해석에서는 CT 시험편의 대칭성을 이용하여 시험편의 1/2만 Fig. 3과 같이 요소분할하고, 2차원 유한요소 탄·소성 해석을 하였다.

요소분할은 요소수를 300개, 절점수를 850개로 하였고, 해석의 정밀도를 높이기 위하여 균열선단 근방은 서브요소 분할하였다. 본 해석에 사용된 유한요소 해석 프로그램은 ANSYS이고, 3각형 6절점요소(6-node structural solid)로 해석하였다.

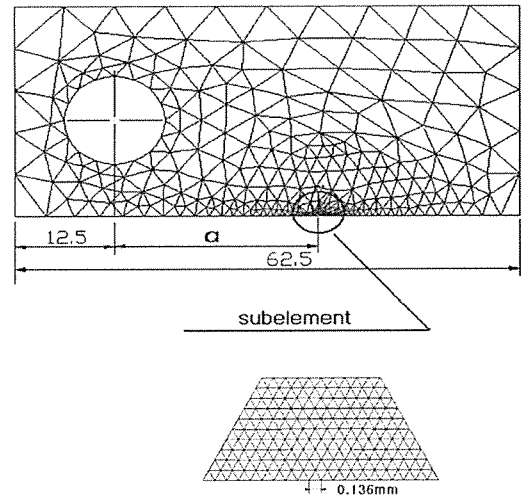


Fig. 3 Mesh pattern of FEM model

3.2 파괴역학인자의 해석

응력세기계수 K 의 해석. Table 1의 탄성계수와 푸와송의 비를 사용하면 a/W (0.1, 0.2, 0.3, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9) 변화에 따른 응력세기계수 K 를 구하였다. 해석의 정밀도 검증하기 위하여 a/W 의 일부 구간을 선정하여 Srawley의 식⁽⁴⁾에 의한 무차원화 응력세기계수 F 와 비교하였다. 또한 J 적분법과 수치해석의 컴플라이언스(compliance) 법을 적용하여 계산한 값들과 비교하여 탄·소성범위의 유한요소해석 K 의 정밀도를 확인하였다.

탄·소성 J 적분의 해석. 물성치 실험에서 구한 그래프를 기본 데이터로 하여 경화계수 H 를 구하고, 이 경

화계수 H 를 사용하여 식⁽⁴⁾에 근거하여 작용하중의 크기에 σ/σ_y 의한 탄·소성 J 를 a/W 에 대하여 구하였다.

3.3 해석결과

Table. 2는 Srawley의 식⁽⁷⁾에 의해 구한 엄밀해와 J 적분법과 컴플라이언스법에 의해 구한 데이터를 비교한 것이다. 각기 다른 셋 방법의 응력세기계수는 $a/W=0.45-0.55$ 범위에서 거의 모두 일치하였다. 그러나, $a/W=0.4$ 에서 컴플라이언스법에 의한 응력세기계수가 커브 피팅에 의한 다소의 오차를 나타내고 있다.

Table 2 Comparison of stress intensity factor in linear elastic body

a/w	FI		
	Srawley	FEM (J-integral)	FEM (compliance)
0.40	7.279	7.278	6.262
0.45	8.340	8.327	8.338
0.50	9.659	9.640	9.991
0.55	11.364	11.348	11.407
0.60	13.654	13.656	12.666

해석에 사용된 재료의 소성거동에 의한 J 적분의 영향을 고려하기 위하여 탄성범위에서의 J 적분값과 소성범위에서의 J 적분값을 비교하였다.

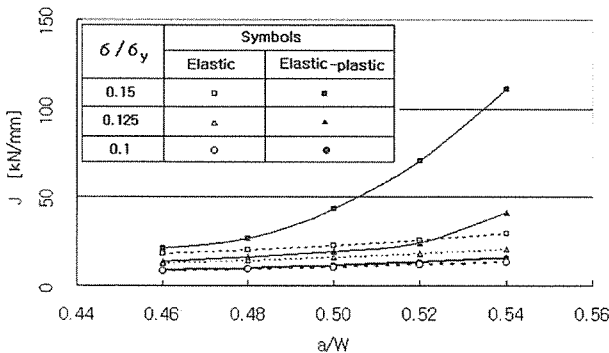


Fig. 4 Elastic-plastic J-integral variation of crack length and yield stress

항복응력의 값이 증가할수록 소성에 의한 J 적분값은 균열의 길이가 길어짐에 따라 점차로 증가하는 현상을 나타낸다. 동일조건인 탄성범위에서 J 의 값은 일정하지만, 작용응력이 증가하면 균열선단에 대한 탄·소성 J 적분 값도 Fig. 4와 같이 증가하는 현상을 볼 수 있다.

이러한 현상은 작용응력이 증가하면 균열선단에 대한 소성변형이 증가하기 때문이다.

4. 실험

4.1 시험편의 형상 및 치수

본 실험에 시험편으로 사용된 재료는 가스터빈(gas turbine) 내부에서 사용되는 Cr-Mo-V 주조 합금강(GE Code B50A224B)으로 조성은 Table 3과 같다. 시험편의 재질은 70년대 말에 설치되어 운전된 가스터빈의 리테인 링으로 상·하부 두 부분으로 구성되어져 있고, 볼트로 조립되어 터빈 내에서 고정익을 지지하는 역할을 한다.

Table 3 Chemical composition of Cr-Mo-V alloy steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.066	0.56	1.24	0.022	0.011	26.64	19.5	0.39

시험편의 채취는 리테인 링의 중심선을 기준으로 평행하게 절단하여 사용하였다. 이 고온부품은 약 700°C의 온도 범위에서 12,000시간 동안의 운전과 1,780번의 기동 정지를 겪은 어느 정도 열화된 재질을 선정하였다. 시험편의 형상 및 치수는 ASTM E318-89의 규정⁽⁸⁾에 따라 Fig. 6과 같은 형상과 치수로 하였다.

4.2 시험편의 제작

시험편의 형상 및 치수는 Fig. 5와 같다. 시험편 소재의 양면을 밀링 가공하고 균열부분은 와이어 컷 방전가공기로 가공하였다.

균열 진전을 명확하게 관찰하기 위하여 시험편 표면은 #80과 #1000의 샌드페이퍼로 최종 가공하였다. 또한 ASTM에 의한 피로 예비균열을 삽입하고, 시험편은 하중선 변위를 측정하기 위하여 클립 게이지를 고정할 수 있도록 하였다.

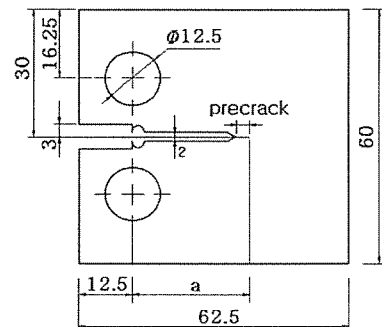


Fig. 5 Dimension of CT specimen

4.3 실험방법

본 실험에 사용된 시험기는 만능 재료시험기 (Instron 4206)를 사용하였다. ASTM E8의 규정에 의한 물성치 실험과 ASTM E813-89에 따른 CT시험편을 사용한 탄·소성 파괴인성 시험을 수행하였다. 이때, 균열 길이의 측정은 이동식 현미경을 사용하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 물성치 실험결과

Fig. 6은 물성치 실험에서 얻어진 응력-변형률 관계를 최소 자승법으로 커브 피팅한 것이다. 여기에서 탄·소성 유한요소 해석에 사용될 탄성계수 E와 소성영역에서의 경화계수(working-hardening parameter) H는 다음식에서 구하였다⁽⁵⁻⁶⁾.

$$\bar{\sigma} = \sigma_y + H \bar{\epsilon}_p^n \quad (13)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 상당소성응력, $\bar{\epsilon}_p$ 는 상당소성 변형률, n은 경화지수(work-hardening exponent), σ_y 은 최초 항복응력(initial yield stress)이다.

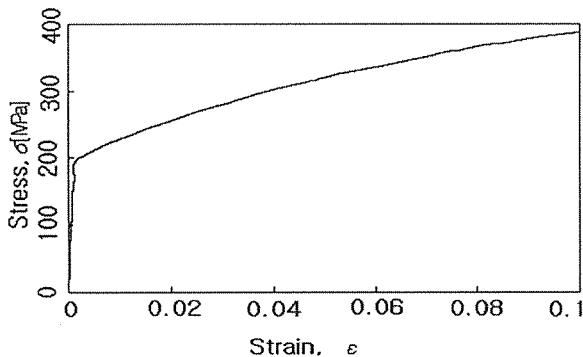


Fig. 6 Stress-strain diagram of specimen material

5.2 탄·소성 JIC 시험결과

ASTM E318-89에 따라 균열선단의 피로 예비 균열을 피로시험기로 삽입한 후, 상온에서 파괴인성시험을 수행하였다. 인장시험 동안의 하중선 변위는 클립 게이지를 사용하여 X-Y 레코더에 기록하여 측정하였다. 탄·소성 파괴인성치를 계산하기 위하여 소성범위에서 1kN단위로 하중을 작용한 후 그 작용하중의 약 10%씩 하강시켜 하중-하중선 변위 선도를 구하였다. 시험시 작용하중 속도는 1mm/min로 하였다.

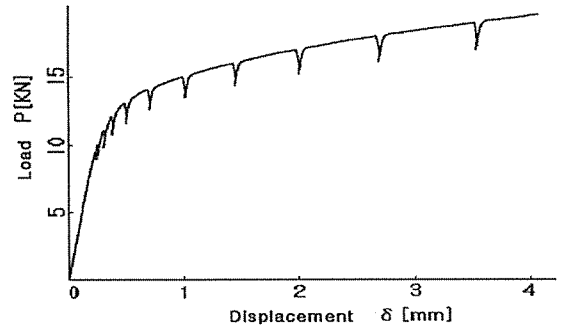


Fig. 7 Load-displacement of load line

Fig. 7은 단일 시험편을 제하 컴플라이언스법으로 시험한 하중-하중선 변위이다. 이 결과를 식⁽⁹⁾에 적용하여 탄성 파괴인성치와 소성 파괴인성치를 합하여 탄·소성 파괴인성치 J를 구하였다. 시험에 의한 결과 J-Δa를 가지고 ASTM E318-89에 따라 Fig. 8과 같은 J-R곡선을 그린다. 여기서, J-Δa를 곡선으로 커브 피팅한 그래프에 블런팅 라인(blunting line)과 0.2% 오프셋 선(offset line)을 적용하여 탄·소성파괴인성 J_{IC}를 구하였다⁽⁹⁻¹⁰⁾. 이러한 값으로 구한 J_{IC}값은 272 kN/m이다.

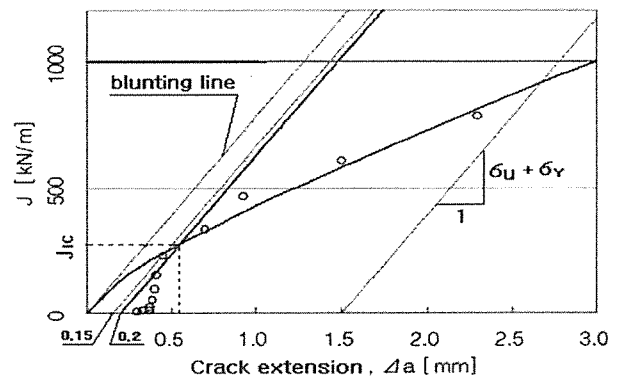


Fig. 8 Determination of J_{IC} from J-R curve

6. 결론

발전설비용 고온부재를 사용하여 유한요소법에 대한 탄·소성 J적분의 해석 및 실험에 의한 파괴인성 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 선형탄성의 경우 유한요소해석에 의한 J적분은 적분 경로에 관계없이 Srawley의 엄밀해와 컴플라이언스법에 의한 응력세기계수 K와 잘 일치하는 것을 검증하였다.
- (2) 연성이 강한 재질은 작용하중이 증가하여 탄성범위를 벗어나면 소성에 의한 J적분값도 증

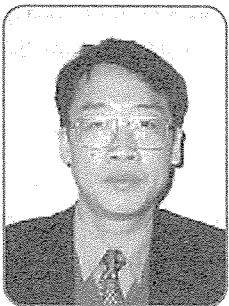
가하므로 탄·소성 J적분 해석의 필요성을 수치해석적으로 확인하였다.

(3) 사용재에 대한 탄·소성 파괴인성치 J_{Ic} 를 실험적으로 구하였으며, 그 결과는 $J_{Ic}=272$ kN/m이다. 모드 I 균열의 경우, 이 값 이상의 응력에서는 부재는 파손된다.

참고문헌

- (1) J.R.Rice, "Trans. A, J. Appl. Mech.," Vol. 35, 1968, pp.379-386.
- (2) "Standard Test Method of Tension Testing of Metallic Material," ASTM Standard E8-89.
- (3) J.W.Hutchinson, J. Mech. Phys. Solids 16, 1968, pp.23-31.
- (4) J.R.Rice, G.R.Rosengren, J. Mech. Phys. Solids 16, 1968, pp.1-22.
- (5) F.Ma, Z.B.Kuang, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Finite Bodies- I," Engineering Fracture Mechanics Vol.48, No.5 1994, pp.727-737.
- (6) F.Ma, Z.B.Kuang, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Finite Bodies-II," Engineering Fracture Mechanics Vol.48, No.5 1994, pp.729-748.
- (7) "Standard Test Method for, A Measure of Fracture Toughness," ASTM Standard E318-89.
- (8) J.E.Srawley, "Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM E399 Standard Fracture Toughness Specimens," Int. J. Fract. Mech., Vol. 12, 1976, pp.475-476.
- (9) 이가용, 장용훈, 이길호, "저주기 피로하중하에서 균열성장에 관한 연구," 대한기계학회 88년도 추계학술대회 초록집, 1988, pp.59-62.
- (10) 최용식, 양원호, 김영진, 석창성, "탄·소성 파괴인성치 결정에 관한 연구," 대한기계학회, 89년도 추계학술대회 초록집, 1989, pp.76-80.

발전기 여자시스템(Ⅱ-Ⅱ) (자동전압 조정장치)



한전전력연구원
발전연구실 발전계전그룹
책임연구원/공학박사 임익헌
Tel : (042)865-5265

여자방식에 비해 전류용량이 큰 정지형을 중심으로 설명하고자 한다. 정지형 여자방식의 경우, 발전기의 출력전압을 변압기를 사용하여 강압시킨 후 반도체 스위칭 소자를 사용하여 제어 정류하여 발전기 계자에 직접 공급하기 때문에 여자변압기와 대용량의 스위칭 소자를 필요로 하게 된다. 정지형 여자시스템의 정류기는 여자변압기, AC filter, 정류부, DC filter, 과전압 억제회로, 초기 여자회로, 계자 접지 검출 회로, 축전압 억제회로 등으로 구성되어 있다. 정류기의 용량 선정에 있어 여유도는 전압, 전류 각각 1.1배로 한다.

II. 여자시스템 정류기

1. 정류기 구성 소자별 이해

정류기는 제어기로부터의 제어신호를 입력받아 발전기의 계자에 직류전압을 공급하는 부분이다. 교류

1) 여자변압기

여자변압기 2차 정격전압의 설계개념은 다음과 같다.

- 과도상태에서의 속응성을 위해 Ceiling Voltage를