

원전 안전등급 저전압계전기 설정시 오차함수 검토

논 문
61-3-3

Review on tolerance factors for 1E UVR setting at NPPs

문수철[†] · 김건중^{*}
(Su-Cheol MOON · Kern-Joong KIM)

Abstract - In nuclear plants, UVR (under voltage relay, 27r) of 1E bus, which protected and supplied power to essential loads, to safety trip of reactor and supplied to starting signal of EDG (emergency diesel generators) automatically. therefore UVR tolerances setting and calculation method has been important to nuclear facility. If calculation and tolerances values differ or ignore, may induced power loss and economical loss by protective failure. This paper show results for calculation methods, and whether dependant or independent methods for factors. included whether PT (potential transformer/voltage transformer) tolerance or not adapted, and based on UVR setting method within a difference minimum and maximum of rated voltage to safety operation in nuclear plants.

Key Words : UVR, PT, Tolerance factor, 1E, Dependant or independent

1. 서 론

저전압계전기는 전력계통에 흔히 사용되는 계전기이나 원자력 발전소에서는 Degraded와 LOV(Loss of Voltage)로 구분하여 안전등급(1E) 안전모선에 사용하는 계전기로 안전모선의 전원 상실(2/4 trip logic) 또는 우선전력계통(PPS: Preferred Power System)의 완전상실시 1E 4.16kV RCP(Reactor Coolant Pump)의 모선 전압상태를 감지하여 원자로냉각, 잔열계통 등의 필수부하에 전원을 공급하기 위해 비상교류전원(EDG: Emergency Diesel Generators)을 자동 기동시키는 역할을 한다.[3]

국내 중수로인 월성원자력은 캐나다 설계사인 AECL (Atomic Energy of Canada Limited)에 의한 노형으로 RCP 동력원은 13.8kV이며 울진1,2호기는 프랑스 Areva사의 Framatome 노형으로 6.6kV가 RCP 동력원으로 사용하고 있다.

원자력발전소의 배전계통 전압설정에 관한 규제요건으로 NRC(US Nuclear Regulatory Commission) NUREG-0800 SRP(Standard Review Plan) BTP(Branch Technical Position) 8-6(2007)과 IEEE 741의 요건에 따른다.[1][2]

UVR 오차율 계산방법은 ASNI/ISA(Instrument Systems and Automation Society)-67.04.01의 요건을 따르며 세부요건과 계산사항은 2장 및 3장에서 기술하였다.[4] 본 논문에서는 UVR LOV 적합성 검토를 345kV switchyard BUS 저전압으로 인한 1E 4.16kV 모선에 저전압이 발생할 경우 1E UVR이 정동작하도록 UVR tap 및 Tolerance 계산법에

대해 규제요건에서 언급하는 오차함수의 적절성을 검토하였고, 상호 함수들에 대한 계산방법을 상호 의존성(dependant)과 독립성(independent) 검토방안을 그림 1과 같이 제안하였다. 또한, UVR setting에 대한 정동작의 정확성을 입증하기 위해 계산을 통해 타당성을 증명하였다.

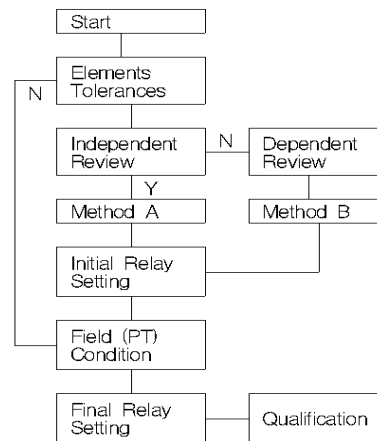


그림 1 검토절차
Fig. 1 Review Process

2. 규제요건 검토

원자력발전소 1E 모선의 UVR과 관련된 규제요건에 대한 역할은 서론에서 언급한 바와 같으며, 그림 2는 IEEE 741에서 언급하는 저전압 보호변수에 대한 일반적인 개념도를 간략화한 것이며 NUREG-0800 및 IEEE 741 요건에 대한 주요 규제요건을 기술하였다.[3]

* 펠로우회원 : 충남대 공과대학 전기공학과 교수
† 교신저자, 정회원 : 충남대 공과대학 전기공학과 박사과정
E-mail : mscheol@kins.re.kr
접수일자 : 2011년 12월 9일
최종완료 : 2012년 2월 22일

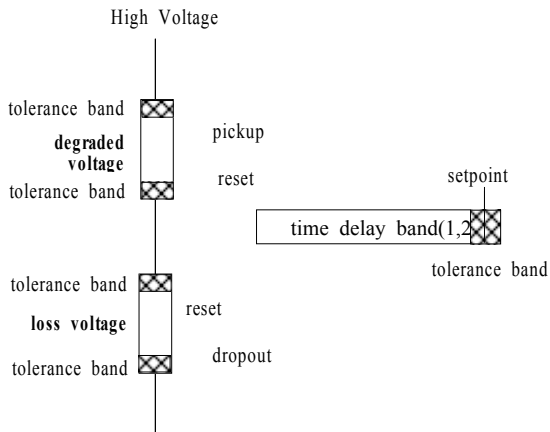


그림 2 IEEE 741에 의한 저전압 보호변수 설정범위
 Fig. 2 General Degraded Voltage Protection Setting Ranges by IEEE 741

2.1 NUREG-0800 및 IEEE 741 주요 규제요건

2.1.1 NUREG-0800 주요 규제요건[1][2]

NUREG-0800은 미국 NRC가 개발·승인한 경수로형 SRP로 국내에서는 미국요건을 준수하여 건설 및 운영단계시 인허가요건으로 사용하고 있다. SRP BTP 8-6 'Adequacy of station electric distribution system voltages'에 의한 주요 전압정정 기준은 다음과 같다.

- ① 저전압 시지연 설정은 소내전력 배전계통에서 1E 부하의 전압요건 분석결과에 의해 결정한다. 저전압보호는 소외전력원이 순간적인 trip을 배제할 수 있도록 각 모선마다 동시논리를 포함해야 한다.
- ② 발전소 과도상태동안 부하 차단할 수 있도록 적절한 개념을 제공할 수 있어야 하고, 운영기술지침서에 1차 저전압보호(소외전원상실)에 대한 설정값의 최대 및 최소치를 갖는 값을 명시해야 한다.
- ③ 안전모선에서의 전압레벨은 최대 및 최소부하상태에서도 최적화하도록 변압기 전압탭의 적절한 조정에 통해 소외전원의 예측 가능한 전압범위내에서 설정해야 한다.
- ④ 전압분석에 사용된 분석적 기법과 가정은 실제 측정에 의해 검증한다. 검증과 시험은 초기 모든 소외전원이 사용되고 원자로 전출력 운영전에 수행되어야 한다.

2.1.2 IEEE 741 주요 규제요건[2][3]

- ① 모선보호용 과전류계전기, 방향계전기 및 차동계전기의 적용은 IEEE Std 141-1993, IEEE Std 242-1986 및 IEEE Std 666-1991, 배전계통의 보호는 IEEE Std 242-1986에 따르며 지락보호에 대한 추가적인 정보는 IEEE Std 142-1991를 적용한다.
- ② 다양한 운전과 사고부하조건에서 1E 모선의 최저전압을 계산하고 기기 최소 동작전압요건을 검토하기 위해 가혹한 부하상태에서 인접 전기기기의 단자전압 결정하며 ⑤에 기술한 tolerances 고려한다. 전동기 기동능력,

모선절체와 순간 전압저하에 의한 부하탈락은 평가되어야 하고, 우선전력원의 최저전압에서도 수행해야 한다.

- ③ UVR 전압설정후 시지연 결정에 대한 분석은 과도상태(전동기 기동과 저전압운전에 따른 부하전류증가)시 보호장치 동작과 기기 열적손상을 포함하여야 한다. 전압상실계전기는 1E 모선 저전압상태의 크기와 시간(Duration) 제한치를 선정해야 한다. 전압과 시지연분석은 계전기의 연쇄 trip이 전동기 기동 또는 고장 및 개폐에 의한 송전망 과도현상에 의해 예측가능한 동적 영향으로부터 발생하지 않는다는 것을 입증하기 위해 수행해야 한다.
- ④ 1E 계통은 고전압 영향을 결정하기 위해 분석해야 하고 설계사고시 부하를 사용하는 것보다 발전소 최소부하인 cold shutdown, refueling mode에서도 계통 최대 전압을 고려해야 한다. 소외전압은 원자로 trip과 예측 가능한 모선절체에 의해 발생하는 과도변동을 고려해야 한다.
- ⑤ Tolerances (UVR LOV)
 - a) Operating tolerances
 - 1) Ambient temperature variations
 - 2) Relay control power variations
 - 3) Accuracy class of potential transformers
 - 4) Repeatability of the relays
 - b) Setting tolerances
 - 1) Meter accuracy
 - 2) Meter calibration tolerance
 - 3) Setting tolerance permitted by procedures.

2.2 고려사항

2.2.1 전압정정 기준

US NUREG-0800, IEEE 741 및 발전소 절차서에 따라 UVR 전압정정시 최소한의 고려사항은 다음과 같다.

- ① NUREG-0800 BTP 8-6에 UVR LOV 설정값이 0.7 PU이하가 되지 않도록 과거 고장분석보고서(Millstone Unit No. 2, Safety Evaluation Supporting Amendment No.6, DPR-65)를 통해 정정치 개선을 권고하고 한다.
- ② IEEE 741에서는 전동기 기동 및 송전계통 과도현상에 불필요하게 동작하지 않도록 정정한다.
- ③ 표준발전소 소내전원 절체시험에 따른 판정기준으로 1E 4.16kV 모선전압 변동범위는 10%인 3,744V ~ 4,400V로 설정하여 정·주기시험을 통해 설비의 건전성을 확인하고 있다.

2.2.1.1 2.2.1.①에 의한 0.7PU로 정정(Tolerance, ±5%)

- ① 전력계통 최소허용전압인 전동기 정격전압 70% (4,000×0.70=2,800V)의 최저전압으로 정정한다.
- ② 2,800V 정정시에 계전기 Tolerance(±5%)를 고려 (2,800×1.05=2,940V, 2,800×0.95=2,660V)하면 최소허용값(2,800V)를 하회한다.

2.2.1.2 전동기 기동전압의 75%로 정정(Tolerance, ±5%)

- ① 전력계통 허용최소전압인 전동기 정격전압 70% (4,000×0.75=3,000V)으로 정정되며, 계전기의 탭 조정은 85.7V탭(3,000V)에 정정, 탭은 90V(3,150V)로서 계통 허용최소전압을 상회한다.
- ② 3,000V 정정시에 계전기 Tolerance(±5%)를 고려 (3,000×1.05=3,150V, 3,000×0.95=2,850V)하면 계통 최소 허용값(3,000V)를 하회한다.

2.2.1.3 모선정격전압의 0.7PU로 정정(Tolerance, ±5%)

- ① 1E BUS 정격전압 70% (4,160×0.70=2,912V)의 최저전압으로 정정한다.
- ② 2,912V 정정시에 계전기 Tolerance(±5%)를 고려 (2,912×1.05=3,057.6V, 2,912×0.95=2,766.4V)하면 최소허용값(2,912V)를 하회한다.

2.2.1.4 모선정격전압의 0.75PU로 정정(Tolerance, ±5%)

- ① 1E BUS 정격전압 70% (4,160×0.75=3,120V)의 최저전압으로 정정
- ② 3,120V 정정시에 계전기 Tolerance(±5%)를 고려 (3,120×1.05=3,276V, 3,120×0.95=2,964V)하면 최소허용값(3,120V)를 하회한다.

2.2.1.5 모선정격전압의 0.8PU로 정정(Tolerance, ±5%)

- ① 1E BUS 정격전압 70% (4,160×0.8=3,328V)의 최저전압으로 정정
 - UVR tap 100V인 경우 3,500V
- ② 3,328V 정정시에 계전기 Tolerance(±5%)를 고려 (3,328×1.05=3,494.4V, 3,328×0.95=3,161.6)하면 최소허용값(3,328V)를 하회한다.
- ③ 3,500V 정정시에 계전기 Tolerance(±5%)를 고려 (3,500×1.05=3,675V, 3,500×0.95=3,328)로 최소허용값(3,328V)를 상회한다.

표 1 전압정정기준 결과

Table 1 Voltage Calibration results

구분(UVR Setting), Tap		4,000V	4,160V	△V	
70%	100%	Tolerance(+5%)	2,940V	3,057V	117V
		Tolerance(0%)	2,800V	2,912V	112V
		Tolerance(-5%)	2,660V	2,766V	103V
75%	100%	Tolerance(+5%)	3,150V	3,276V	126V
		Tolerance(0%)	3,000V	3,120V	120V
		Tolerance(-5%)	2,850V	2,964V	114V
	90%	Tolerance(0%)	3,150V	3,744V	594V
	80%	Tolerance(0%)	2,800V	3,328V	528V
80%	100% (96V)	Tolerance(+5%)	-	3,494V	-
		Tolerance(0%)	-	3,328V	-
		Tolerance(-5%)	-	3,161V	-
	100% (100V)	Tolerance(+5%)	3,360V	3,675V	315V
		Tolerance(0%)	3,200V	3,500V	300V
		Tolerance(-5%)	3,040V	3,328V	288V

현재 전압상실계전기 정정기준인 2.2.1.①의 권고사항을 고려하지 않고 임의로 가정한 Tolerance 5%로 사용하여 전동기 정격의 70%(2,800V)를 적용하고 있다. 상기 전압정정기준에 대한 검토결과는 다음 표 1과 같이 tolerance에 의한

UVR 설정값이 4kV(0.7PU) 보다는 4.16kV(0.8PU)일 경우 적합한 계산결과가 된다는 것을 알 수 있다.

1E BUS 정격전압으로 검토한 결과 3,120V 또는 3,500V로 10.25% 또는 20% 이상 차이가 있다. 따라서 UVR 정정값에 대한 정확성과 설비의 안전성을 위하여 계전기 전압차가 최소/최대가 발생함에 따라 고려하지 않은 변수를 포함하여 재검토를 수행하였고 세부사항은 3장에서 설명하였다.

3. UVR Tolerance 검증

3.1 고려사항

IEEE 741에서 요구하는 UVR 오차고려 검토대상은 2.1.2 ⑤항에서 제시한 바와 같으며 검증을 위한 계산절차와 Operating Tolerance는 가능한 모든 오차함수를 반영해야 하나 국내의 원전 UVR LOV dropout 설정시 PT 오차율을 고려하지 않아 본 본문에서는 LOV setting에서 PT 오차율 정확도를 고려한 결과를 비교하였다. 보다 정확한 오차율 계산은 전 출력단계마다 기기 Calibration을 통하여 정정하는 것이 규제요건에 부합된다.

3.1.1 LOV(Loss Of Voltage) Tolerance 계산법[4]

ISA-67.04.01에서 언급하고 있는 오차계산법은 일반적인 다음과 같다.

$$Tolerance = \sqrt{a^2 + b^2} \tag{1}$$

$$Tolerance = \sqrt{(a+b)^2} \tag{2}$$

함수 a, b 요소가 상호 독립적일때는 (1)식을, 상호 의존적일때는 (2)식을 적용한다.

3.2 LOV(Loss Of Voltage) Relay Setting Values

참고문서[6]에 의하면 LOV 정정은 1E 전동기 기동시 허용값(75%)보다 적은 값인 80V에 정정했으나 이는 2.2.1.①의 요건에 만족하지 않는다. 따라서 Relay Pickup setpoint를 3가지로 분류하여 LOV 정정치를 계산한다. 본 계산에서 사용된 Relay Pickup setpoint value는 다음과 같다.

Relay Pickup setpoint : 80V, 90V, 105V

PT ratio : 35(4,200/120V)

PT correction factor : 0.99856(general)

PT tolerance : 0.3%

Max. dropout accuracy : +0.3V(OMICRON)[9]

- error < 0.08%rd+0.02%rg at 300V

Allowable Value Tolerance : about ±5% (ABB 27N)

D: Drift allowance (±0.1%)

ST: setting tolerance ((±0.5V/80V)×100=±0.625%)

R: readability of measure device (0.025%)

$$AVT = \pm \sqrt{D^2 + ST^2 + R^2} \tag{3}$$

식(3)에 따라 AVT=±√(0.625²+0.625²+0.025²)=±0.884%이나 ±5%는 보수적인 값으로 검증의 용이성을 위해 사용하였다. 계산순서는 계전기의 허용전압(AV: Allowable Voltage)과 1E 모선에 대한 최대, 최소전압범위로 하며 최소허용전압이 UVR의 LOV 정정값을 의미한다.

3.2.1 Relay Pickup setpoint : 80V 정정(0.66PU)

① Pickup voltage

- Max. AV at relay = 80V×(1+0.05)=84V
- Max. AV at bus = 84V×35×0.99856=2,935.7V
- Nominal AV at relay = 80V
- Nominal AV at bus = 80V×35×0.99856=2,795.9V
- Min. AV at relay = 80V×(1-0.05)=76V
- Min. AV at busy = 76V×35×0.99856=2,656.1V

표준원전 계산결과 및 설정값에 의하면 max 2,942V 이하 및 min 2,658V로 설정하여 PT correction factor는 1보다 작아야 하나 검토결과 1 이상인 값으로 계산한 것으로 검토되어 계산결과는 적합하지 않다. 따라서 정확한 설정을 위해 PT correction factor가 필요하다.

② Dropout(reset) voltage

- Max. AV at relay = 84V+0.3V=84.3V
- Max. AV at bus = 2,935.7V+0.3V=2,936V
- Nominal AV at relay = 80V+0.3V=80.3V
- Nominal AV at bus = 2,795.9V+0.3V=2,796.2V
- Min. AV at relay = 76V+0.3V=76.3V
- Min. AV at busy = 2,656.1V+0.3V=2,656.4V

3.2.2 Relay Pickup setpoint : 90V 정정(0.75PU)

0.7PU이상으로 정정하는 것이 UVR 오동작 또는 오부동작을 방지하기 위한 상기 2.2.1.①의 요건에 부합한 것으로 검토되었고 검토결과는 표 2와 같다.

3.2.3 Relay Pickup setpoint : 105V 정정(0.875PU)

105V로 정정한 경우는 미국발전소 SONGS 2&3호기에 적용된 계산방법을 참고하였다.[7][8] 국내에서는 AVT 및 측정장비에 따른 정확도가 국내 참고값과는 상이하다. 이에 일반적인 AVT(±5%)를 적용하면 표 2와 같고 3.2.4항과 대조적이다.

표 2 LOV 분석 결과

Table 2 LOV Analysis results

구분		80V (0.66PU)	90V (0.75PU)	105V (0.75PU) AVT(±5%)	105V (0.75PU) AVT(±0.6%)
Pickup Voltage	Max relay	84V	94.5V	110.25V	105.63V
	Max bus	2,935.7V	3,302.7V	3,853.2V	3,691.7V
	Nom relay	80V	90V	105V	105V
	Nom bus	2,795.9V	3,145.4V	3,699.7V	3,669.7V
	Min relay	76V	85.5V	99.75V	104.37V
	Min bus	2,656.1V	2,988.1V	3,486.2V	3,644.6V
Dropout Voltage	Max relay	84.3V	94.8V	110.55V	105.93V
	Max bus	2,936V	3,303V	3,853.5V	3,692V
	Nom relay	80.3V	90.3V	105.3V	105.3V
	Nom bus	2,796.2V	3,145.7V	3,670V	3,670V
	Min relay	76.3V	85.8V	99.78V	104.67V
	Min bus	2,656.4V	2,988.4V	3,486.5V	3,644.9V

3.2.4 Relay Pickup setpoint : 105V 정정(0.875PU)

3.2.3항의 오차율과 비교하기 위해 설계사에서 사용한 AVT(±0.6%)를 적용하면 표 2와 같고, 운영기술지침서에 개정한 정정값으로는 최소전압(3644.89V)과 최대전압(3694.5V)이다.[6][10]

3.3 TLU uncertainties considerations

UVR Degraded voltage setting에서 더 고려해야 할 사항으로 TLU(Total Loop Uncertainty)이다. 이는 기계식, 전자식 계전기에 대한 여러 변수들에 대한 사항을 고려하는 것으로 상호 독립적으로 평가하고 있다.

pickup voltage tap;

$$TLU = \pm \sqrt{Te^2 + D^2 + PSe^2 + Se^2 + Re^2 + He^2 + MTE^2 + ST^2 + Ma^2 + PEA_{random}^2 + PEA_{bias}^2} \quad (4)$$

time delay tap

$$TLU = \pm \sqrt{Te^2 + D^2 + PSe^2 + Se^2 + Re^2 + MTE^2 + ST^2 + Ma^2} \quad (5)$$

Te: calibration temperature allowance (±0.297%)

D: voltage tap and time delay drift (±0.1%)

PSe: power supply effects (±0.1%)

Se: seismic effect

Re: radiation effect

He: humidity effect

MTE : measuring and test equipment (0.1%)

ST: relay tap setting tolerance (±0.085%)

Ma: miscellaneous allowance (0.1%)

PEA(random): primary element allowance (±0.012)

PEA(bias): primary element allowance (0.017)

여기서는 국내자료가 전무하므로 참고자료[5][6]의 BASLER(BE1-27)와 ABB(27D)의 계전기에서 제공한 자료를 근거로 3.3.1항에는 BE1-27계전기의 TLU=+0.918%/ -0.935%와 3.3.2항에는 27D계전기의 TLU=+0.375%/ -0.392%을 적용하였다.[7][8]

3.3.1 BASLER(BE1-27)

3.3.1.1 Relay Pickup setpoint evaluation (0.66PU)

① Pickup voltage

- Max. voltage at relay = 80V×(1+0.00918)=80.73V
- Max. voltage at bus = 80.73V×35×0.99856=2,821.4V
- Nominal voltage at relay = 80V
- Nominal voltage at bus = 80V×35×0.99856=2,795.9V
- Min. voltage at relay = 80V×(1-0.00918)=79.26V
- Min. voltage at busy = 79.26V×35×0.99856=2,770V

② Dropout(reset) voltage

- Max voltage at relay = 80.73V+0.3V=80.76V
- Max. voltage at bus = 2,821.4V+0.3V=2,821.7V
- Nominal voltage at relay = 80V+0.3V=80.3V
- Nominal voltage at bus = 2,795.9V+0.3V=2,796.2V
- Min. voltage at relay = 79.26V+0.3V=79.56V
- Min. voltage at busy = 2,770V+0.3V=2,770.3V

스위치야드 345kV 모션전압이 75%로 감소할 경우, 4.16kV 모션전압은 대략 (1PU=345kV)로 0.75PU/SAT (station auxiliary transformer) turns ratio에 따라 계산하면 (0.75×345kV)/(345×0.975)/4.36(4.16)=3,353V(3,200V)로 1E 4.16kV 모션의 전압이 3,353V는 UVR LOV 정정치인 최소 dropout voltage 2,770.3V/2,785.7V보다 크므로 전압 80V는 부적합함이 검토된다. 또한 1E 4.16kV을 적용할 경우 3,200V로 dropout voltage보다 크다.

3.3.1.2 Relay Pickup setpoint evaluation (0.75PU)

표 3의 계산결과와 같이 스위치야드 345kV 모션전압

(1PU=345kV)이 75%로 감소할 경우, 4.16kV 모선전압은 대략 0.75PU/SAT turns ratio에 따라 계산하면 (0.75×345kV)/(345×0.975)/4.36(4.16)=3,353V (3,200V)로 1E 4.16kV 모선의 전압이 3,353V는 UVR LOV 정정치인 최소 dropout voltage 3,116.8V/ 3,093.2V보다 크므로 전압 90V는 부적합한 것으로 검토된다.

3.3.1.3 Relay Pickup setpoint evaluation (0.8PU)

표 3의 계산결과와 같이 스위치야드 345kV 모선전압이 75%로 감소할 경우, 4.16kV 모선전압은 대략 0.75PU/SAT turns ratio에 따라 계산하면 (0.75×345kV)/(345×0.975)/4.36(4.16)=3,353V(3,200V)로 1E 4.16kV 모선의 전압이 3,353V는 UVR LOV 정정치인 최소 dropout voltage 3,463.1V/3,482.1V보다 적으므로 전압 Tap 100V는 적합한 것으로 검토된다.

3.3.2 ABB(27D)

3.3.2.1 Relay Pickup setpoint evaluation (0.66PU)

① Pickup voltage

Max. voltage at relay = 80V×(1+0.00375)=80.3V
 Max. voltage at bus = 80.3V×35×0.99856=2,806.4V
 Nominal voltage at relay = 80V
 Nominal voltage at bus = 80V×35×0.99856=2,795.9V
 Min. voltage at relay = 80V×(1-0.00375)=79.7V
 Min. voltage at busy = 79.7V×35×0.99856=2,785.4V

② Dropout(reset) voltage

Max voltage at relay = 80.3V+0.3V=80.6V
 Max. voltage at bus = 2,795.9V+0.3V=2,796.2V
 Nominal voltage at relay = 80V+0.3V=80.3V
 Nominal voltage at bus = 2,795.9V+0.3V=2,796.2V
 Min. voltage at relay = 79.7V+0.3V=80V
 Min. voltage at busy = 2,785.4+0.3V=2,785.7V

3.3.2.2 Relay Pickup setpoint evaluation (0.75PU) 및 (0.8PU)

3.3.2.1항의 Pickup voltage 및 Dropout(reset) voltage 계산 방법과 같이 BASLER와 ABB사의 계전기에 대한 0.75PU 및 0.8PU의 TLU 정정값은 표 3과 같다.

3.3.3 LOV(Loss Of Voltage) Relay Time Values

3.3항의 식 (5) TLU 식에 따라 계산하면

$$TLU = \pm \sqrt{0.297^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0^2 + 0^2 + 0.1^2 + 0.085^2 + 0.1^2} = \pm 0.368\% \quad (6)$$

X(1+0.00368) sec + 10 cycles ≤ 1.0 sec
 1.00368X sec + 0.167 sec ≤ 1.0 sec
 1.00368X ≤ 1.0 - 0.167 = 0.833

따라서, LOV 최대 차단시간 X ≤ 0.8299 sec 이다.

3.4 4.16kV MOTOR 전압차

3.4.1 Relay Pickup setpoint (0.66PU)

1E 4.16kV 전동기는 정격전압 75%에서 동작한다면

$$V_{\text{relay}} = (0.75 \times \text{rated motor voltage}) / \text{PT ratio} \quad (7)$$

$$= (0.75 \times 4,160V) / 35 \times 0.99856 = 89.27V$$

또한, 전동기와 모선간 전압강하가 없다고 가정하면

$$V_{\text{relay_min}} = 89.27 \times (1 - 0.00935) / (1 - 0.00375)$$

$$= 88.43V / 85.27V$$

$$V_{\text{relay_max}} = 89.27 \times (1 + 0.00935) / (1 + 0.00375)$$

$$= 90.10V / 89.60V$$

VTS(voltage tap setting)를 80V일 경우 최대전압차는 최대 -10.1V가 된다.

$$V_{\text{relay_min_80}} = 80 \times (1 - 0.00935) / (1 - 0.00375)$$

$$= 79.25V / 79.7V$$

$$V_{\text{relay_max_80}} = 80 \times (1 + 0.00935) / (1 + 0.00375)$$

$$= 80.74V / 80.3V$$

표 3 ABB와 BASLER 27 TLU 분석 결과

Table 3 ABB와 BASLER 27D TLU Analysis results

구분		80V(0.66PU) ΔV(V)	90V(0.75PU) ΔV	100V(0.80PU) ΔV
Pickup Voltage	Max relay	BAS 80.73V	90.82V	100.91V
		ABB 80.3V	90.33V	100.37V
	Max bus	BAS 2,821.4V	3,174.1V	3,526.7V
		ABB 2,806.4V	3,157.2V	3,462.5V
	Nom relay	BAS 80V	90V	100V
		ABB 80V	90V	100V
	Nom bus	BAS 2,795.9V	3,145.4V	3,494.9V
		ABB 2,795.9V	3,145.4V	3,494.9V
	Min relay	BAS 79.26V	89.17V	99.08V
		ABB 79.7V	89.66V	99.62V
Min bus	BAS 2,770V	3,116.4V	3,462.8V	
	ABB 2,785.4V	3,092.9V	3,481.8V	
Dropout Voltage	Max relay	BAS 80.76V	91.12V	101.21V
		ABB 80.6V	90.63V	100.67V
	Max bus	BAS 2,821.7V	3,174.4V	3,527.0V
		ABB 2,796.2V	3,157.5V	3,462.8V
	Nom relay	BAS 80.3V	90.3V	100.3V
		ABB 80.3V	90.3V	100.3V
	Nom bus	BAS 2,796.2V	3,145.7V	3,495.3V
		ABB 2,796.2V	3,145.7V	3,495.3V
	Min relay	BAS 79.56V	89.47V	99.11V
		ABB 80V	89.96V	99.92V
Min bus	BAS 2,770.3V	3,116.8V	3,463.1V	
	ABB 2,785.7V	3,093.2V	3,482.1V	

3.4.2 Relay Pickup setpoint (0.75PU)

3.4.1항의 계산결과와 가정에서와 같이

$$V_{\text{relay_min}} = 88.43V / 85.27V$$

$$V_{\text{relay_max}} = 90.10V / 89.60V \text{ 이고,}$$

VTS를 90V일 경우 최대전압차는 4.73V가 된다.

$$V_{\text{relay_min_90}} = 89.15V / 89.65V$$

$$V_{\text{relay_max_90}} = 90.83V / 90.33V$$

3.4.3 Relay Pickup setpoint (0.80PU)

3.4.1항의 계산결과와 가정에서와 같이

$$V_{\text{relay_min}} = 88.43V / 85.27V$$

$$V_{\text{relay_max}} = 90.10V / 89.60V \text{ 이고,}$$

VTS를 100V일 경우 최대전압차는 14.73V가 된다.

$$V_{\text{relay_min_100}} = 99.05V / 99.61V$$

$$V_{\text{relay_max_100}} = 101.03V / 100.36V$$

3.4.4 Relay Pickup setpoint (0.80PU)

3.4.1항의 계산결과와 가정에서와 같이

$V_{relay_min} = 88.43V/85.27V$
 $V_{relay_max} = 90.10V/89.60V$ 이고,
 VTS를 105V일 경우 최대전압차는 19.73V가 된다.
 $V_{relay_min_105} = 104.0V/104.59V$
 $V_{relay_max_105} = 106.08V/105.37V$

3.5 평가방법에 의한 결과

3.5.1 Method A(상호독립적 평가, PT 제외)

허용오차에는 계전기 성능과 관련된 오차, 시험장비의 오차 율등이 필요하다. PT 오차율은 제외한 Tolerance는 다음과 같다.

- a. Relay tolerance : ±5%
- b. Relay cont. volt variation : ±0.25%
- c. Relay amb. Temp. variation : ±0.625%
- d. Test Equipment : ±0.3%
- e. Margin : ±0.3%

(1)의 Tolerance =

$$\sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2} = \sqrt{5^2 + 0.25^2 + 0.625^2 + 0.3^2 + 0.3^2}$$

= ±5.063%

3.5.2 Method A(상호독립적 평가, PT 포함)

PT 오차율을 포함하고 선로전압강하를 제외한 Tolerance는 다음과 같다.

- f. PT accuracy : ±0.3%

(1)의 Tolerance =

$$\sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2 + f^2} = \sqrt{5^2 + 0.25^2 + 0.625^2 + 0.3^2 + 0.3^2 + 0.3^2}$$

= ±5.072%

3.5.3 Method B(상호의존적 평가)

전압변화에 민감한 계전기 및 PT에 대해 상호의존적으로 평가할 경우 Tolerance는 다음과 같다.

(2)의 Tolerance =

$$\sqrt{(a+b+c+f)^2 + d^2 + e^2} = \sqrt{(5+0.25+0.625+0.3)^2 + 0.3^2 + 0.3^2}$$

= ±6.189%

상호독립적 평가를 기준으로 22.22%의 오차율이 발생하여 4.16kV 기준으로 924.35V, PT 2차측 전압 120V 기준으로 26.66V, 상호의존적 평가가 기준일 경우는 18.19% 오차율이 발생하고 4.16kV 기준으로 756.70V, PT 2차측 전압 120V 기준으로 21.83V 전압차가 발생한다.

3. 결론

본 논문에서 제안된 오차율계산법과 PT 오차율 고려여부에 따라 UVR 동작설정범위는 상당한 차이가 있다는 것을 알 수 있으며 3.5항 평가방법에 따라 계전기 오차율 변수가 상호 독립적임을 가정하였으나 계전기 부속품 특성에 따라 temperature, humidity, voltage, radiation 상호간 상관관계가 존재함으로 점진적으로 고려할 필요가 있다.

최적의 RVTS(relay voltage tap setting)은 0.75PU로 평가되었고 전압차가 가장 적어 선로, 변압기, 측정기기등의 손실을 최소화할 수 있는 것으로 검토되었다. 다만, 스위치야드

선로의 전압강하에 따른 모선과 보호계전기간 최소동작전압을 검토했을 경우, RVTS는 100V가 적합하다.

따라서 다소 복잡하지만 가능한 많은 계기와 장비의 오차율을 반영하고 실측자료를 통해 최적의 UVR 설정범위를 재검토하는 것이 원자력발전소의 안전성 유지와 불시정지를 최소화하여 전력기기 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] NUREG-0800, Standard Review Plan, chapter 8 and BTP 8-6(Adequacy of Station Electric Distribution System Voltages), NRC, 2007
- [2] Pressure Water Reactor Standard Review Plan, Appendix 8-6(Adequacy of Station Electric Distribution System Voltages), KINS, 1999
- [3] IEEE Std. 741, IEEE Standard Criteria for the Protection of Class 1E Power Systems and Equipment in Nuclear Power Generating Stations, 2007
- [4] ANSI/ISA-67.04.01, Setpoints for Nuclear Safety Related Instrumentation, 2000
- [5] ABB company, single-phase voltage relays Instructions, pp. 5-9, 1984
- [6] Final Report of Technical Specification revised to 1E bus UVR setting of nuclear plants, KOPEC, pp3-15, 2010
- [7] Calculation E4C-015, Rev.0 TLU Calculation for Loss of Voltage Relays at Class 1E 4.16kV Switchgear, Song Unit 2&3, 2007
- [8] Calculation E4C-130, ICCN C-7, Proposed Change (218kV) SONGS Unites 2 and 3, 2005
- [9] OMICRON CMC 356, technical data, device accuracy
- [10] Background on Technical Specification of Standard Nuclear Plant B3.8(Power System)

저 자 소 개



문 수 철 (文 修 哲)

1973년 8월 22일생. 1996년 제주대 전기공학과 졸업(학사). 2000년 ~ 2005년 한국전기안전공사 근무. 2005년 5월 ~ 현재 한국원자력안전기술원. 발송배전기술사. 2008년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사), 2010년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



김 건 중 (金 建 中)

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1980년~현재 충남대 전기공학과 교수