

# 초고압 송전선로 활선공법 개요 및 기술 동향

## (活線功法 : Live-Line Maintenance Technology)

- 이 동 일 / 전력연구원 전력계통연구실 송전기술그룹 그룹장
- 최 인 혁 / 전력연구원 전력계통연구실 송전기술그룹 선임연구원
- 정 윤 환 / 전력연구원 전력계통연구실 송전기술그룹 일반연구원

### 개 요

우리나라는 2003년 5월부터 아시아에서 가장 높은 송전 전압인 765kV를 사용하여 아시아 최초로 실 선로에서 송전하여 지금까지 성공적으로 운전을 해오고 있다. 특히 우리나라가 우리의 지리적, 환경적 조건을 고려한 수직배열 2회선 765kV 방식을 세계에서 처음으로 국산화 개발하고 독자적으로 확립하여 이제는 중국의 750kV 사업과 동남아 500kV 사업 등에 국산 기술을 수출하는 효과를 거두고 있어 더욱 고무적이라 할 수 있다.

지금까지 765kV 초고압 송전선로 건설에 필요한 설계 기술, 건설 기술, 기자재 국산화 등에 대하여 성공적으로 기술 개발을 완료하였으나 건설 후 운영 및 유지보수에 필요한 효율적인 기술 개발이 필요한 시점에 이르게 되었다.

765kV 송전선로와 같은 초고압 송전선로는 매우 중요한 국가 기간 설비 중의 하나로서 인체의 동맥과 같아 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 초고압 송전선로는 여타의 설비와 달리 계통 전체에 미치는 영향이 매우 크다. 그렇기 때문에 불의의 사고 발생시에는 막대한 손실을 초래할 우려가 있어 특히 운영 및 유지보수의 중요성이 매우 크다고 하겠다. 또한 765kV 송전 선로의 경우 단위 회선 당 송전 전력량이 크기 때문에 휴전 시 경우에 따라 계통안정도에 영향을 미칠 수 있고, 유지보수를 위해 송전 선로의 운용을 중단할 경우 많은 발전 제약 비용이 지불되는 비경제적인 요소 또한 가지고 있다. 이러한 측면에서 향후 정전에 의한 유지보수는 매우 많은 대체 비용으로 인하여 작업 수행에 어려운 상황에 처할 것으로 보여 진다.

북미나 유럽과 같이 지역이 넓고 전력계통이 루프화가 되어있지 않은 선진 외국의 경우에는 초고압 송전선로의 활선작업이 매우 일반화되어 있다. 정전을 최소화시켜 전력 공급 중단에 의한 손실비용을 최소화하고 송전 신뢰도의 확보를 위해 송전선로 유지보수의 대부분을 활선 상태에서 수행하고 있는 상황이다.

이에 반하여 우리나라의 경우에는 그간 송전 활선 작업에 대한 필요성을 거의 체감하지 못하였으며, 이에 대한 기술개발도 전무한 상황이다. 특히 우리나라의 초고압 송전선로는 대부분 2회선으로 구성되어 있어 1회선 정전을 통한 유지보수가 가능하였기 때문에 활선 작업의 필요성을 피부로 느끼지 못하였다. 하지만 전력산업을 둘러싼 환경변화(전력산업 구조개편) 및 유지보수 환경 변화(765kV 1회선 사업 등)등으로 인하여 활선작업에 의한 송전선로 유지보수가 불가피할 것으로 전망되기 때문에 이에 대한 공법과 장비에 대한 개발이 향후 필요불가결할 것으로 사료된다.

### 초고압 송전선로 활선 공법의 이론적 배경

초고압 송전선로의 활선작업을 위한 최소 접근거리는 활선에 직접 접촉하여 작업을 하는 경우에는 그다지 큰 의미를 가지지 않지만 각종 활선 작업 장비의 운용이나 보조 작업자의 안전을 위하여 반드시 검토되어야 한다. 최소 접근거리의 산출에 대해서는 IEC 61472 및 IEEE 516에 규정되어 있다.

가. IEC 61472에 의한 최소 접근거리 산출 방법

IEC 61472에서의 최소접근거리 계산 과정은 다음과 같다.

① 작업지역에서의 개폐과전압( $U_2$ )과 절연내전압( $U_{90}$ )을 계산한다.

$$U_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_s \times u_2$$

$U_s$  : 계통최고전압(highest voltage of a system)

$u_2$  : 과전압배수(per unit overvoltage)

여기서 과전압배수의 일반적인 값은 다음과 같다.

표 1 과전압배수의 일반적인 수치

Us (kV)	Phase to Ground				Phase to Phase			
	Closing		Three-phase reclosing		Closing		Three-phase reclosing	
	without resistors	with resistors	without resistors	with resistors	without resistors	with resistors	without resistors	with resistors
72.5~245	2.3	—	3.0	—	3.5	—	4.5	—
300~500	2.3	1.8	2.6	2.1	3.4	2.9	3.9	3.2
800	—	1.8	—	2.0	—	2.9	—	3.2

한편 봉-평균 공극간의 50%섬락전압( $U_{50RP}$ )은 공극 d에 대해 다음과 같다.

$$U_{50RP} = 1080 \times \ln(0.46d + 1)$$

따라서 작업지역에서의 절연내전압( $U_{90}$ )은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_{90} = k_s \times U_{50}$$

$$= k_s \times k_g \times k_a \times k_f \times k_i \times U_{50RP}$$

$$= k_i \times U_{50RP}$$

$$= k_i \times 1080 \times \ln(0.46d + 1)$$

$k_s$  : 고유의 편차계수 (=0.936)

$k_g$  : 갭계수(gap factor = 1.2)

$k_a$  : 기압계수(atmospheric factor)

$k_f$  : 공중부양물체의 움직임에 의한 거리 증감계수(0.85 or 1.0)

$k_i$  : 애자손상에 의한 증감계수 ( $k_i = 1 - 0.8k_d n_d / n_0$ )

$n_d$  : 손상된 애자의 수

$n_0$  : 1련당 애자의 수

$k_d$  : 유리애자 1.0, 자기애자 0~1.0(평균 0.75)

$$K_i = k_s \times k_g \times k_a \times k_f \times k_i$$

② 절연내전압( $U_{90}$ )에 대한 최소절연거리( $D_U$ )를 계산한다.

$$D_U = 2.17 \left( e^{\frac{U_{90}}{1080k}} - 1 \right) + F$$

F : 공중고정(floating electrodes)부분이 존재할 경우의 공극방향 길이

③ 계획되지 않은 작업자 움직임과 같은 환선작업에 대한 안전거리( $U_E$ )를 추가로 고려한다.

$$D_A = D_U + D_E$$

:

$D_A$  : 최소접근거리

$D_E$  : 작업자의 안전거리(ergonomic distance)

여기서 작업자의 안전거리( $U_E$ )는 72.5kV이상의 전압에서 일반적으로 0.2m~1.0m의 고정 값을 사용하며, 북미지역에서는 1ft (0.31m)를 일반적으로 사용하고 있고, 유럽지역에서는 전력회사별로 각각 다르게 적용하고 있다.

이상에서 언급한 방식인 IEC 61472에 의해 각 전압별 최소접근거리를 계산해 보면 표 2와 같다. 계산에 사용된 대부분의 조건은  $k_s = 1.1$ ,  $k_y = 0.936$ ,  $k_x = 1.2$ ,  $k_a = 1.0$ (sea level),  $k_f = 1.0$ ,  $k_i = 1.0$ ,  $n_d = 0.0$ (no broken insulators)으로서  $k_f = 1.12$ 를 적용하였다. 환선작업에 대한 안전거리는 북미지역에서 적용하고 있는 0.31m를 고려하였다.

나. IEEE 516(1995)에 의한 방법

IEEE에서는 공극길이와 내전압간의 실험적인 관계곡선으로부터 접근거리(D)를 산출하고 있다. 이 접근거리(또는 절연거리)는 계통의 상-대지전압과 최대 개폐과전압 배수(T)에 따라 달라지며, 다음 식으로 계산 된다.

$$D = (C_1 C_2 + a) \times T \times kV_{LG}$$

D : 절연거리 (ft)

$C_1$  : 0.01 또는 계통 상-대지전압의 1%

$C_2$  : 1.1, 공극에 공구가 없는 경우는 1.0

a : 630kV 이상의  $\sqrt{2} \times T \times kV_{LG}$  피크전압에 대한 포화요소

표 2 IEC 61472방식에 의한 최소접근거리의 계산 예

Us(kV)	362	362	362	550	550	800	800
$u_2$	2.1	2.3	2.6	1.8	2.3	1.8	2.0
$U_2$ (kV)	621	680	768	808	1033	1176	1306
$U_{90}$ (kV)	683	748	845	889	1136	1293	1437
$k_f$	1.0	1.0	0.85	1.0	0.85	1.0	0.85
F(m)	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.5
$n_0$	18	18	18	25	25	35	35
$n_d$	0	0	5	0	10	0	10
$k_i$	1.0	1.0	0.83	1.0	0.76	1.0	0.83
$K_f$	1.12	1.12	0.80	1.12	0.73	1.12	0.79
$D_U$ (m)	1.64	1.85	3.73	2.35	7.38	4.13	10.00
$D_A$ (m)	1.95	2.16	4.04	2.66	7.69	4.44	10.31

T : 예측된 최대 개폐과전압배수

$kV_{LG}$  : 계통의 실제 상-대지전압(실효치)

이상의 방식에 의한 상-대지간 최소 공기절연거리는 표 3과 같다.

**표 3 IEEE 516(1995) 방식에 의한 최소공기절연거리의 계산 예**

상간전압[kV] 상대지전압[kV]	362			550			800		
	210			320			462		
구분 T	a	ft	m	a	ft	m	a	ft	m
1.5	0.0	3.17	0.97	0.3	4.97	1.51	2.5	8.66	2.64
1.6	0.0	3.42	1.04	0.6	5.46	1.66	3.0	9.60	2.93
1.7	0.0	3.58	1.09	1.0	5.98	1.82	3.5	10.60	3.23
1.8	0.0	3.83	1.17	1.3	6.51	1.98	4.0	11.64	3.55
1.9	0.0	4.00	1.22	1.6	7.08	2.15	4.5	12.73	3.88
2.0	0.0	4.20	1.28	2.0	7.68	2.34	5.0	13.86	4.22
2.1	0.0	4.41	1.34	2.3	8.27	2.52	-	-	-
2.2	0.1	4.70	1.42	2.6	8.87	2.70	-	-	-
2.3	0.3	5.01	1.51	2.9	9.49	2.90	-	-	-
2.4	0.6	5.34	1.53	3.3	10.21	3.11	-	-	-
2.5	0.8	5.87	1.73	-	-	-	-	-	-
2.6	1.0	6.01	1.63	-	-	-	-	-	-
2.7	1.2	6.36	1.94	-	-	-	-	-	-
2.8	1.4	6.73	2.04	-	-	-	-	-	-
2.9	1.6	7.10	2.15	-	-	-	-	-	-
3.0	1.8	7.48	2.28	-	-	-	-	-	-

T : Maximum anticipated per-unit transient overvoltage

a : Saturation factor in thousandths

활선작업에 따른 안전거리 및 고도에 따른 보정은 고려하지 않았음.

### 다. IEC 및 IEEE 방식에 의한 최소절연거리의 비교

이 두 방식의 최소절연거리를 비교하기 위해서는 개폐과전압배수인 IEC의  $u_2$ 와 IEEE의 T 계산방식을 다음과 같이 수정할 필요가 있다.

$$u_2 = (T + 0.25) / 1.25$$

또한 IEEE방식에서 고려하고 있지 않은 손상된 애자 및 공중고정부분이 없는 것으로 간주하여 비교하면 표 4와 같이 과전압배수가 낮은 경우에는 IEC방식이, 과전압배수가 높은 경우에는 IEEE방식이 수치상으로는 약간 크게 나타나지만 대체로 거의 일치한다고 볼 수 있는 정도이다.

## 활선 공법의 분류

### 가. 작업 방식에 의한 분류

초고압 송전선로의 활선 공법은 기본적으로 직접 활선 공법(Bare-hand), 절연 봉 공법(Hot Stick), 중간 절연

표 4 IEC 및 IEEE방식에 의한 공기절연거리의 비교

$U_s(kV)$	362	362	550	550	800	800
$kV_{LG}(kV)$	209	209	318	318	462	462
T	2.0	3.0	1.5	2.4	1.5	2.0
$u_2$	1.8	2.6	1.4	2.12	1.4	1.8
a	0.0	0.0018	0.0003	0.0033	0.0025	0.0050
$U_2(kV)$	532	768	629	952	914	1176
$U_{90}(kV)$	585	845	692	1047	1006	1293
$k_1$	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
$D_U(m)$	1.35	2.19	1.67	2.98	2.80	4.13
D(m)	1.28	2.27	1.51	3.11	2.64	4.22
$D_U/D$	1.05	0.96	1.10	0.96	1.06	0.98

봉 공법(Intermediate)과 같은 3가지 방식으로 분류할 수 있으며, 이 방식에 기초하여 국가별, 작업위치별, 전력 설비별 특징에 따라 선택적으로 적용되고 있다. 직접 활선 공법은 선로 전압과 작업자를 등전위로 만든 후 작업자가 선로에 직접 접촉하여 작업을 시행하는 공법으로서 가장 일반적으로 사용되고 있다. 절연 봉 공법은 절연봉의 길이가 길면 조작성이 어려워지기 때문에 주로 낮은 전압 레벨에서의 손쉬운 작업 등에 사용되고 있다. 중간 절연 봉 공법은 전압이 높아지면서 절연봉의 길이가 길게 되어 절연 봉 공법의 적용이 어렵게 되는 문제를 해결하기 위하여 작업자를 선로전압과 접지전압의 중간 위치에 고정시켜 작업하는 공법으로서, 절연봉의 길이를 줄이기 위해 채택된 공법이며 북미 일부 지역에서 사용되고 있다.

#### 나. 접근 방식에 의한 분류

초고압 송전선로에 작업자가 접근하는 방식에 따라 절연로프 접근공법(Rope), 이동활차 접근공법(Trolley Pole), 애자런 탑승공법(String Working), 작업사다리 공법(Insulated ladder), 크레인 접근 공법(Boom Truck), 헬기 접근 공법(Helicopter)으로 분류할 수 있다.

로프 접근방법은 절연로프를 이용하여 진자방식(Pendulum)에 의해 접근하는 방식과 철탑 암에서 하강하여 활선 단으로 접근하는 방식이 있으며, 이동활차 접근방식은 철탑 암의 하단에 슬라이드(Slide)와 이동활차(Trolley Pole)를 설치하여 탑승 상태에서 작업자가 절연로프 또는 임시 애자런에 탑승하여 암 끝으로 슬라이드를 이용하여 활선 단에 접근하는 방식 등이 사용되고 있다. 애자런 탑승공법은 작업자가 도전 복을 착용하고 내장 애자런을 통해 활선 단에 접근하는 방식으로 현재 러시아, 헝가리, 우크라이나 등에서 사용하고 있다. 작

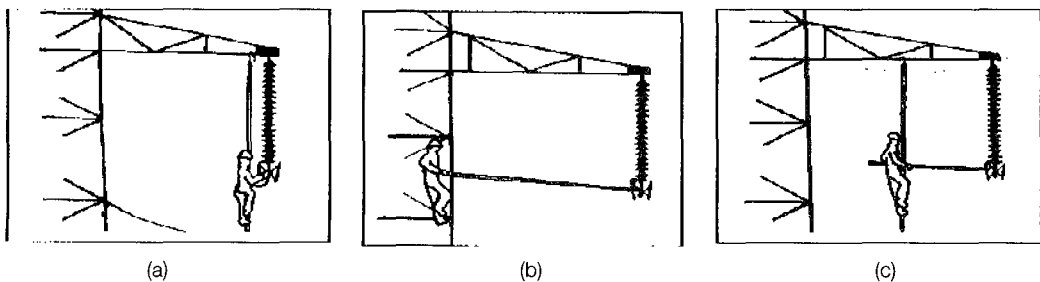


그림 1 활선 공법의 개념도

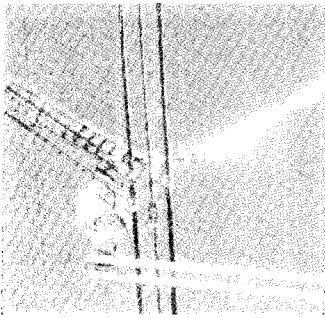


그림 2 직접 활선 공법 장면

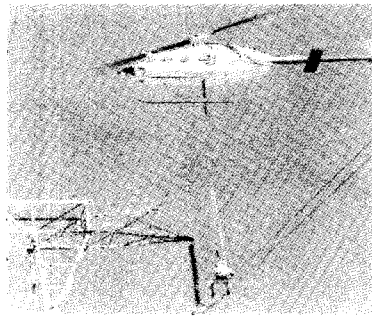


그림 3 헬기 활선 공법 장면

업 사다리 공법은 절연사다리를 철  
탑에서 선로까지 견고하게 설치하  
여 작업자가 직접 작업 위치로 이  
동하는 방식으로 북미지역에서 많  
이 사용되고 있는 공법이다. 크레  
인 접근 공법은 특수설계로 절연시  
킨 붐 트럭을 이용하여 작업자를  
선로에 접근시키는 방식으로 평지  
에서 수평배열 철탑에 사용하기 적  
합하며, 헬기 접근 공법은 경간에

서의 보수 및 활선 애자 청소 등에 주로 많이 활용되고 있다.

## 해외의 초고압 송전선로 활선 작업 현황

현재 국외에서는 미국, 캐나다, 헝가리, 프랑스, 남아프리카공화국, 사우디아라비아, 러시아, 우크라이나 외  
기타 몇 국가에서 초고압 송전선로에 활선 공법을 적용하고 있는 것으로 알려져 있다. 미국의 경우 1910년부  
터 연구를 추진하여 현재는 활선공법에 의한 유지보수에 활용하고 있으며 헬기공법, 직, 간접 활선공법 등 다  
양한 활선공법을 개발하여 실 선로에 적용하고 있다. 캐나다에서는 50여 년간의 연구 경력을 확보하고 활선 공  
법에 대한 노하우를 해외에 수출하고 있으며 직접 활선, 절연 봉 및 중간 절연 봉 등 다양한 공법을 적용중이다  
. 또한 헝가리의 경우에는 750kV 송전선로를 활선 공법을 사용해 유지보수를 수행하고 있으며 작업자가 선로  
에 직접 접근하여 작업하는 직접 활선 공법을 주로 채택하고 있다. 남아프리카공화국의 경우 765kV 송전선로  
유지보수의 소요의 90%이상을 활선 작업으로 수행하고 있으며 헬기 활선 공법을 적용하고 있다. 그리고 러시  
아와 우크라이나에서는 1940년대부터 활선공법을 개발하여 현재 선로 유지보수에 적용중이며 대부분 직접 활  
선 공법으로 유지보수를 수행하고 있다.

일반적으로 초고압 송전선로에서의 활선작업은 매우 위험한 작업으로 인식되고 있으며, 특히 인명과 직접적  
인 관련이 있기 때문에 작업의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위해서는 공법 및 관련 장비의 안전성, 송전선로  
에서의 작업자에게 미칠 수 있는 전기적인 영향에 대한 고려, 활선공법에 대한 기술적 규정 등이 확보되어야  
하며, 현재 공법을 운용하고 있는 각 국의 전력회사들은 이러한 기술적인 배경과 규격을 근간으로 하여 자국  
의 선로 환경에 대한 기술적 검토사항과 전압에 적합한 기술사항 등을 고려하여 자체적인 작업지침이나 기술  
기준을 가지고 활선작업을 수행하고 있다. 각 국에서 수행중인 송전선로 활선작업의 주요내용은 다음과 같다.

- 불량애자 및 애자런 교체
- 스페이서 또는 스페이서 덮개 교체
- 전선 보수 및 슬리브 압착 작업
- 위험성이 있는 금구류 교체
- 일부 전선 교체
- 애자 세정 작업 등

이러한 활선 작업들은 대부분 전기공사 전문 업체에 의하여 수행되고 있으며, 작업과 관련한 절차와 지침 등  
은 전력회사와 협의하여 수행되고 있다.

## 초고압 송전선로 활선작업의 현황 및 기술 동향

각 국에서는 위에 예시한 분류 기준 중 자국의 경제적, 기술적 상황에 적합한 기준에 따라 공법을 선정하여 운영하고 있으며 활선 작업에 대한 일반적인 기술들을 이미 많이 개발하여 보유하고 있다. 우리나라의 경우 현재까지 기술적인 축적 및 운용실적이 전무한 상태에서 개발이 시행되어야 되기 때문에 외국의 기술개발 실적을 토대로 하여 우리나라 실정에 적합한 활선 공법과 장비를 개발해야 할 필요성이 있다. 하지만 우리나라에서의 초고압 송전선로 활선 공법 도입 및 개발 시에 객관적인 측면에서 보자면 운용실적이 검증된 외국의 공법을 그대로 적용하는 것이 타당할 것으로 생각될 수 있지만 외국의 선로조건 및 환경과 우리나라의 경우는 매우 다르기 때문에 그대로 적용하기에는 어려움이 있다고 사료된다. 향후 철탑 형상 및 구조적인 차이, 철탑의 높이, 유지보수를 위한 환경 및 지리적 조건 (특히 우리나라의 송전선로는 산악 지를 경과하고 있어, 대부분의 철탑이 산악지에 위치하고 있으며, 특히 경사지에 위치한 선로도 상당히 많은 부분을 차지하고 있어 접근성이 매우 좋지 못하다.) 등의 제약조건 및 기술적 사항을 고려한 공법 및 장비의 개발이 필요하며 개발 이후에 실증 시험을 통하여 활선 공법 및 장비의 신뢰성을 확보해야 한다. 현재 우리나라의 실정에 맞는 초고압 송전선로 활선 공법의 정립을 위하여 공법 및 장비, 작업조건, 규정, 기술 기준 등에 대한 수집 및 체계적인 연구의 필요성이 커지고 있다.

하지만 현재까지 송전선로의 활선작업과 관련한 국내의 연구개발 실적이 매우 미진하고, 유지보수를 위한 활선장비나 공구의 개발이 없었고, 외국 제품에 대한 자세한 기술적 사항이나 제품관련 규격에 대한 사항도 잘 알려지지 않은 상황이어서, 송전선로 활선장비 및 공구 관련 기술이 취약한 상태이다. 또한 활선작업이 가능한 기술자가 확보된 상황이 아니며, 경험자가 많지 않아 송전선로의 활선작업이 가능한 조건이어도 인력확보에 어려움이 있기 때문에 활선작업 적용은 어려운 실정이다. 따라서 연구실적 및 인력의 부재, 이와 관련된 각종 기술기준 및 작업기준의 부재로 말미암아 활선작업의 수행이 어려운 상황이다.

이러한 현안들을 해결하기 위하여 한국전기공사협회 주관으로 한전 전력연구원, 한국전기연구원, 한전기공, 광명전업사가 참여하여 전력연구개발사업인 “초고압 송전선로 활선공법 및 관련장비 개발” 과제가 수행되고 있다. 현재 이 연구 과제를 통하여 선진국의 초고압 송전선로 활선공법 및 장비에 대한 현황을 조사 분석하고 국내 초고압 송전선로에서의 활선 공법 적용 타당성 제시를 하고 있으며, 우리나라의 실정에 맞는 활선 공법 및 장비를 개발 중에 있다. 향후 과제의 수행을 통하여 관련 인력을 양성하고 기술축적을 통해 각종 작업관련 규정 및 기술기준 등 다양한 관련 지침을 만들어 나갈 예정이다. 최종적으로는 과제 수행을 통하여 초고압 송전선로 활선공법에 대한 장비 설계, 각종 공법, 기술기준, 규정에 대한 자체적인 개발을 통하여 기술의 국산화 달성이 가능할 것으로 기대된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, 초고압 송전선로 활선공법 및 관련장비 개발을 위한 조사연구, 2002. 07
- [2] 산업자원부, 초고압 송전선로 활선공법 및 관련장비 개발, 1차년도 중간보고서, 2003. 11
- [3] 한국전력공사, 전력수송의 고속도로 765kV 송전기술, 전력기술홍보자료, 2002
- [3] Live working-Minimum approach distance- Method of calculation, IEC 61472, 1998
- [4] Minimum approach distance : calculation. IEC 61472, 1998
- [5] Maintenance Methods on Energized Power Lines IEEE Std 516, 1995
- [6] Eric Marshall , “ESKOM Transmission Live work” , 2004